

*XXIV Школа-семинар молодых ученых и специалистов
под руководством академика РАН А.И.Леонтьева,
посвященная 100-летию академика РАН В.Е.Алемасова*

ПРОБЛЕМЫ ГАЗОДИНАМИКИ И ТЕПЛОМАССООБМЕНА В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ



23 – 27 мая 2023 года
г. Казань, Россия

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Организаторы

**XXIV Школы-семинара
молодых ученых и специалистов
под руководством
академика РАН А.И. Леонтьева,
посвященной 100-летию
академика РАН
В.Е. Алемасова**

Российская академия наук

Отделение энергетики, машиностроения,
механики и процессов управления

Национальный комитет РАН
по тепло- и массообмену

Федеральный исследовательский центр
«Казанский научный центр РАН»

Правительство Республики Татарстан

Общество с ограниченной ответственностью
Научно-производственное предприятие
«ИРВИС»

EXTENDED ABSTRACTS
*of the XXIV School-Seminar
for Young Scientists and Specialists
under supervision of Professor A.I. Leontiev,
Academician of the Russian Academy
of Sciences,
dedicated to the 100th Anniversary
of V.E. Alemasov,
Academician of the Russian Academy of Sciences*

**PROBLEMS OF GAS DYNAMICS,
HEAT AND MASS TRANSFER
IN POWER PLANTS**

May 23 – 27, 2023
Kazan, Russia

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ
XXIV Школы-семинара
молодых ученых и специалистов
под руководством
академика РАН А.И. Леонтьева,
посвященной 100-летию академика РАН
В.Е. Алемасова

ПРОБЛЕМЫ ГАЗОДИНАМИКИ
И ТЕПЛОМАССОБМЕНА
В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

23 – 27 мая 2023 года
г. Казань, Россия

Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках: Тезисы докладов XXIV Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН ХИ. Леонтьева, посвященной 100-летию академика РАН В.Е. Алемасова (23 - 27 мая 2023 г. г. Казань).- Казань: ООО ПК «Астор и Я», 2023. — 432 с.

ISBN 978-5-6049421-5-4

Сборник включает тезисы лекций и докладов, включенных в программу XXIV Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А. И. Леонтьева, посвященной 100-летию академика РАН В. Е. Алемасова. Они охватывают широкий круг фундаментальных и прикладных проблем в области конвективного тепло- и массообмена в однофазных и многофазных потоках, теплообмена в условиях химических превращений, радиационного, сложного и сопряженного теплообмена, интенсификации процессов передачи тепла, методики и средств промышленных и лабораторных измерений параметров текучих сред и т.д. Рассматриваются также вопросы развития методов математического моделирования при решении задач теплофизики и энергетики.

Тезисы печатаются в авторской редакции методом прямого репродуцирования с авторских оригиналов.

© Национальный комитет РАН по тепло- и массообмену,
Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН». Составление, 2023

ISBN 978-5-6049421-5-4

© Авторы, 2023

ОО ПК «Астор и Я», оформление, 2023

Уважаемые коллеги!

В 2023 году XXIV Школа-семинар молодых ученых и специалистов «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках» организуется на базе Казанского научного центра РАН в г. Казани. Бессменным руководителем Школы являлся недавно ушедший из жизни Александр Иванович Леонтьев, академик РАН, много лет возглавлявший Национальный комитет РАН по теплообмену. На этот раз столь важное научное мероприятие посвящено столетию со дня рождения выдающегося российского ученого-энергетика академика РАН Вячеслава Евгеньевича Алемасова. С учетом такой даты, а также крайне сложной ситуации в мире с энергетикой, тематика конференции представляется особенно важной.

В программу XXIV Школы-семинара включены более 200 докладов, из них около 40 лекций ведущих российских учёных-теплофизиков.

По традиции нашей Школы основной акцент делается на всестороннем обсуждении секционных стендовых докладов с выбором лучших по каждой из семи секций и награждением молодых ученых дипломами и призами на процедуре закрытия Школы-семинара.

Выражаю признательность руководителю Института энергетики и перспективных технологий ФИЦ КазНЦ РАН, д.т.н., профессору Н.И. Михееву, директору ООО НПП «Ирвис», к.т.н. Д.В. Кратирову, а также их сотрудникам за гостеприимство и четкую работу по организации XXIV Школы-семинара.

Желаю участникам Школы плодотворной работы, творческих успехов и новых контактов!

**Лауреат премии «Глобальная энергия»,
академик РАН**

С.В. Алексеенко



АЛЕМАСОВ Вячеслав Евгеньевич – выдающийся ученый, один из основоположников казанской научно-педагогической школы теплоэнергетики и реактивного двигателестроения, академик РАН, академик Международной академии астронавтики, почетный член Академии наук Республики Татарстан. Выпускник Казанского авиационного института (1947 г.) он с 1965 по 1989 г. возглавлял первую в стране кафедру ракетных двигателей, воссозданную при его непосредственном участии.

Работал председателем президиума Казанского филиала АН СССР (с 1990 г. – Казанский научный центр), директором Отдела энергетики Казанского научного центра РАН. В.Е. Алемасов – основатель нового научного направления по расчету и исследованию теплофизических свойств продуктов сгорания ракетных топлив и аэротермохимии процессов в ракетных двигателях.

Работы В.Е. Алемасова и его соратников обеспечили передовой уровень теории отечественного ракетно- и двигателестроения и высшего образования в этой отрасли. Широко известны, переведены за рубежом и сохраняют свое значение труды В.Е. Алемасова – фундаментальный десяти томный справочник по свойствам продуктов сгорания ракетных топлив и выдержавший 4 издания учебник «Теория ракетных двигателей». За эти работы В.Е. Алемасов дважды был удостоен Государственной премии СССР в области науки и техники. Около 30 лет В.Е. Алемасов занимался проблемой создания новых методов и устройств интенсификации извлечения природных битумов и вязких нефтей.

Одной из важнейших заслуг В.Е. Алемасова является успешная подготовка научно-педагогических кадров высшей квалификации. Им подготовлено 20 докторов и около 70 кандидатов наук. Получили признание заслуги В.Е. Алемасова в деле воспитания молодых ученых. Указом Президента Республики Татарстан учреждена Государственная премия

Республики Татарстан имени В.Е. Алемасова, присуждаемая ежегодно с 2015 года. Состоялось десять Школ молодых ученых и специалистов В.Е. Алемасова, из них пять – при его жизни и непосредственном руководстве.

Вячеслав Евгеньевич был очень разносторонним человеком, строгим к себе и друзьям, любил и понимал шутки, ценил хорошую компанию, интересовался литературой и искусством. Наверное, лучше всего его характер отражает любимые им строчки Риммы Казаковой, высеченные на его памятнике:

*Отечество, работа и любовь –
вот для чего и надобно родиться,
вот три сосны, в которых – заблудиться
и, отыскавшись, – заблудиться вновь.*

Дорогие друзья и коллеги!

Именно такими словами каждые два года начиналось обращение Александра Ивановича Леонтьева к участникам созданной им Школы-семинара молодых ученых и специалистов «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках». В этом году впервые Школа-семинар пройдет уже без Александра Ивановича. Ее организация – дань памяти этому выдающемуся ученому, Учителю и настоящему Интеллекту.

Первая Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством А.И. Леонтьева была проведена в 1977 году в г. Иваново. В дальнейшем, включая сложные для Российской науки 90-е годы, Школа-семинар неизменно проводилась один раз в два года в разных городах Российской Федерации. Проводилась благодаря энтузиазму Александра Ивановича.

Академик А.И. Леонтьев всегда являлся активным генератором новых научных и технических идей. Вместе с С.С. Кутателадзе он создал асимптотическую теорию турбулентного пограничного слоя. Впервые обнаружил явление интенсификации теплообмена в области взаимодействия скачка уплотнения с турбулентным пограничным слоем, выявил эффекты ламинаризации пограничного слоя в сопле и влияния вдува на коэффициент восстановления. Им впервые аналитически получены значения критических параметров отеснения пограничного слоя от проницаемой стенки. Предложенная А.И. Леонтьевым физическая модель течения парожидкостной смеси в области кризиса позволила разработать основы проектирования систем теплоотвода предельной мощности с естественной циркуляцией двухфазного теплоносителя. Предложенный им метод температурной стратификации сверхзвуковых газовых потоков лег в основу изобретения, запатентованного под названием «Устройство безмашинной тепловой стратификации газа (труба Леонтьева)», создающее принципиально новую возможность реализации цикла работы холодильной установки с газовым рабочим телом.

Выдающийся российский ученый, основатель научной школы теплотехники в области теории теплообмена в энергетическом оборудо-

вании, автор множества пионерских работ, получивших признание мирового научного сообщества, Александр Иванович был необыкновенно демократичен в быту. Доброжелательность к людям, исключительное обаяние, искрометный юмор и огромный интеллект делали общение с ним необычайно привлекательным для его учеников и последователей.

Подготовка к проведению XXIV Школы-семинара началась в 2022 году по инициативе и при непосредственном участии А.И. Леонтьева. Выбор места проведения Школы обусловлен тем, что г. Казань – центр научных исследований и разработок в области теплообмена, сосредоточенных в известных как в России, так и за рубежом университетах и институтах КазНЦ РАН.

Желаем всем участникам Школы новых плодотворных контактов и больших творческих успехов!

Оргкомитет Школы

СЕКЦИИ XXIV ШКОЛЫ-СЕМИНАРА

Секция, посвященная памяти и творческому наследию А.И. Леонтьева	
Председатели	академик РАН, д. ф.-м.н. С.В. Алексеенко (Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск) д.т.н. Н.И. Михеев (ФИЦ Казанский научный центр РАН)
Секция 1. Фундаментальные проблемы тепло- и массообмена при однофазной конвекции	
Председатели	д.ф.-м.н. С.А. Исаев (Санкт Петербургский государственный морской технический университет) д.ф.-м.н. П.Г. Фрик (Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь) д.т.н. В.М. Молочников (ФИЦ Казанский научный центр РАН)
Секция 2. Тепло- и массообмен в двухфазных и многофазных потоках	
Председатели	член-корр. РАН, д. ф.-м.н. А.Н. Павленко (Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск) д.т.н. И.А. Давлетшин (ФИЦ Казанский научный центр РАН) д.ф.-м.н. В.В. Кузнецов (Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск)
Секция 3. Тепло- и массообмен в условиях химических превращений, горение	
Председатели	д.ф.-м.н. Г.В. Кузнецов (НИ Томский политехнический университет, Томск) д.т.н. Л.С. Яновский (Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, Москва) член-корр. РАН, д.т.н. А.В. Дедов (НИУ «Московский энергетический институт»)
Секция 4. Радиационный, сложный и сопряженный теплообмен, в том числе дисперсные потоки и пористые среды	
Председатели	д.т.н. А.И. Гурьянов (Рыбинский государственный авиационный технический университет) к.ф.-м.н. Д.О. Дуников (Объединенный институт высоких температур РАН, Москва) к.т.н. Г.Г. Яньков (НИУ «Московский энергетический институт»)
Секция 5. Интенсификация процессов тепло- и массообмена	
Председатели	д.т.н. В.И. Терехов (Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск) д.ф.-м.н. П.А. Стрижак (НИ Томский политехнический университет) д.т.н. И.А. Попов (Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ)
Секция 6. Прикладные задачи тепломассообмена	
Председатели	д.т.н. А.С. Дмитриев (НИУ «Московский энергетический институт») д.т.н. И.В. Деревич (Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана) д.ф.-м.н. Е.М. Смирнов (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого)
Секция 7. Методы и средства промышленных и лабораторных измерений параметров текучих сред (круглый стол)	
Председатели	д.т.н. С.З. Сапожников (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого) д. т. н Н.И. Михеев (ФИЦ Казанский научный центр РАН) к.т.н. Д.В. Кратиров (ООО НПП "Ирвис", Казань)

ЛЕКЦИИ

В.В. Кузенов¹, С.В. Рыжков², Е.А. Воронина²

¹Всероссийский НИИ Автоматики им. Н.Л. Духова, г. Москва

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
105005, г. Москва, 2-я Бауманская, д. 5 *

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЗАМАГНИЧЕННЫХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗАХ И ПЛАЗМЕ

Рассмотрены тепловые свойства сред, сжимаемых и нагреваемых высокоскоростными потоками частиц и плазменными струями, а также короткоимпульсным энергетическим лазером, в том числе широкополосным излучением (драйверами), под действием внешнего приложенного магнитного поля [1-3].

Преобразование энергии драйвера в энергию пучков и излучений из плазмы имеет очень высокую эффективность по сравнению с классическими ускорителями. Плазма, генерирующая нейтроны в диапазоне МэВ, может являться драйвером подкритичной ядерной системы, в которой в цепочках превращений, запускаемых этими нейтронами, нарабатывается ядерное топливо и одновременно утилизируются отходы ядерного топливного цикла.

Это открывает перспективы для новых источников и приборов нейтронов в медицине, материаловедении, различных гибридных системах, в том числе установках и устройствах ядерного синтеза. Представлено численное исследование эффективности взаимодействия лазерных лучей, плазменных струй и потоков частиц с замагниченной мишенью.

Также представлен обзор по генерации мощных потоков частиц и излучений высоких энергий в неравновесной плазме с сильным магнитным полем. Рассмотрены и другие приложения реакций синтеза – в качестве источника нейтронов, когда не требуется поддерживать тепловое состояние горячей плазмы, как это предполагается в концепции реактора. Отсутствие требования по превышению выхода энергии над вкладом позволяет создавать сильно неравновесную нетепловую плазму с большой долей высокоэнергетичных компонентов, инициировать реакции синтеза и частично окупить энергетические затраты на поддержание неравновесного состояния.

Авторами разработаны численные методы и методики и вычислительные коды для нестационарных радиационно-магнитогазодинамических моделей, пред-

*С.В. Рыжков, svryzhkov@bmstu.ru

назначенных для описания теплофизических процессов в различных типах высокотемпературных установок [4-7]. Численное решение, разработанной нестационарной радиационно-магнитогазодинамической модели, базируется на методе расщепления по физическим процессам.

Список литературы

1. **Гаранин С.Г., Ивановский А.В., Куликов С.М., Мамышев В.И., Певный С.Н., Рогачев В.Г.** Инерционный термоядерный синтез с применением взрывомагнитных генераторов // Физика плазмы. 2022. Т. 48. С. 131 – 140.
2. **Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V.** Calculation of plasma dynamic parameters of the magneto-inertial fusion target with combined exposure // Physics of Plasmas. 2019. V. 26. P. 092704.
3. **Ryzhkov S.V., Chirkov A.Yu.** Alternative Fusion Fuels and Systems. CRC Press, Taylor & Francis, 2018. P. 200.
4. **Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V.** Estimation of the neutron generation in the combined magneto-inertial fusion scheme // Physica Scripta. 2021. V. 96. P. 125613.
5. **Ryzhkov S.V., Kuzenov V.V.** New realization method for calculating convective heat transfer near the hypersonic aircraft surface // ZAMP. 2019. V. 70. P. 46.
6. **Ryzhkov S.V., Kuzenov V.V.** Analysis of the ideal gas flow over body of basic geometrical shape // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. V. 132. P. 587.
7. **Кузенов В.В., Рыжков С.В.** Численное моделирование взаимодействия мишени магнитно-инерциального термоядерного синтеза с плазменным и лазерным драйверами // ТВТ. 2021. Т. 59, № 4. С. 492 – 501.

V.V. Kuzenov, S.V. Ryzhkov, E.A. Voronina

Bauman Moscow State Technical University,
Russia 105005 Moscow, 2-nd Baumanskaya, 5, 1

MODELING OF THERMAL PHYSICS PROCESSES IN THE MAGNETIZED HIGH-TEMPERATURE GASES AND PLASMA

С.А. Исаев^{1,2}

¹ Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
190121, г. Санкт-Петербург, ул. Лодманская, д. 3

² Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации
имени Главного маршала авиации А.А. Новикова,
196210, г. Санкт-Петербург, ул. Пилотов, д. 38*

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ СТРУКТУРИРОВАННЫЕ ПОВЕРХНОСТИ ПЛОСКИХ ПЛАСТИН И СТЕНОК МИНИ- И МАКРОКАНАЛОВ НА ОСНОВЕ ЯВЛЕНИЯ АНОМАЛЬНОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ОТРЫВНОГО ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА В НАКЛОННЫХ КАНАВКАХ

Энергоэффективные структурированные поверхности занимают заметное место в актуальном разделе теплофизики. Недавно было сделано открытие аномальной интенсификации отрывных течений и теплообмена в наклонных канавках на плоских пластинах и стенках каналов [1, 2]. Простейшие канавки представляют собой две половинки сферической лунки соединенные длинной траншеей. Рассматриваются как единичные, так и одно- и многорядные канавки. Угол наклона канавки, ее удлинение и глубина оказывают кардинальное влияние на интенсификацию процессов переноса. При углах наклона от 30 до 65°, удлинениях порядка 4 и выше, глубинах порядка 0,2 – 0,3 от ширины канавки в ней индуцируются ультравысокие скорости возвратного и вторичного течения, сравнимые с характерными скоростями, формируются зоны относительного трения и теплоотдачи, многократно превосходящие внутри канавок трение и теплоотдачу на плоской стенке. Интенсификация течения и теплообмена связана с экстраординарными перепадами давления, обусловленными торможением потоков на наветренных склонах и разрежением в ядрах смерчеобразных вихрей, самоорганизующихся в сферических сегментах. Эксперименты обнаружили эти перепады. Также подтверждено ускорение потока в ядре узкого канала со структурированной стенкой [3-12].

Список литературы

1. **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. Vol. 163 (Part.A). P. 202-207.
2. **Isaev S.A., Gritckevich M.S., Leontiev A.I., Milman O.O., Nikushchenko D.V.** NT Vortex enhancement of heat transfer and flow in the narrow channel with a

* С.А. Исаев, isaev3612@yandex.ru

dense packing of inclined one-row oval-trench dimples // Int. J. Heat Mass Transf. 2019. Vol. 145, No. 18737. P. 1 – 13.

3. **Исаев С.А., Грицкевич М.С., Леонтьев А.И., Попов И.А., Судаков А.Г.** Аномальная интенсификация турбулентного отрывного течения в наклоненных однорядных овально-траншейных лунках на стенке узкого канала // ТВТ. 2019. Т. 57. № 5. С. 797 – 800.

4. **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 наклоненных овально-траншейных лунок на стенке // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т.26. №5. 697-702.

5. **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. Том 46. Вып. 21. С. 18 – 21.

6. **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 наклоненными овально-траншейными лунками при использовании различных сеток и моделей турбулентности // ТВТ. 2021. Т. 59. № 1. С. 116 – 125.

7. **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.

10. **Исаев С.А.** Генезис аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена в наклонных канавках на структурированных поверхностях // МЖТ. 2022. № 5. С. 13 – 24.

11. **Isaev S., Leontiev A., Gritskевич M., Nikushchenko D., Guvernuyuk S., Sudakov A., Chung K.-M., Tryaskin N., Zubin M., Sinyavin A.** Development of energy efficient structured plates with zigzag arrangement of multirow inclined oval trench dimples // Int. J. Thermal Sciences. 2023. Vol. 184. No. 107988.

12. **Исаев С.А.** Аэрогидродинамические механизмы интенсификации физико-энергетических процессов на структурированных энергоэффективных поверхностях с вихревыми генераторами // Теплофизика и аэромеханика. 2023. Т. 30. № 1. С. 83 – 88.

S.A. Isaev^{1, 2}

¹ Saint-Petersburg State Marine Technical University,
Russia 190121 Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 3

² A.Novikov Saint-Petersburg State University of Civil Aviation,
Russia, 196210 Saint-Petersburg, Pilot's, 38

ENERGY-EFFICIENT STRUCTURED SURFACES OF FLAT PLATES AND WALLS OF MINI- AND MACROCHANNELS ON THE BASIS OF THE PHENOMENON OF ANOMALOUS INTENSIFICATION OF SEPARATED FLOW AND HEAT TRANSFER IN INCLINED GROOVES

А.П. Сорокин, Ю.А. Кузина, Н.А. Денисова

Государственный научный центр Российской Федерации –
Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского,
249033, г. Обнинск, Калужская обл., пл. Бондаренко, д. 1

ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОГИДРАВЛИКИ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ (ДОСТИГНУТЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЙ)

Изложены результаты экспериментальных и расчетно-теоретических исследований в области гидродинамики и теплообмена в быстрых реакторах и ускорительно-управляемой системы с жидкометаллическими теплоносителями, сформулированы проблемы и задачи дальнейших исследований. Рассмотрены и анализируются физические явления, эффекты, закономерности и характеристики процессов, протекающих в проточной части и активной зоне быстрых реакторов: полей скорости и температуры, структуры и характеристик турбулентного переноса импульса и энергии, гидравлического сопротивления каналов и сборок твэлов, гидродинамике коллекторных систем, теплоотдачи в каналах и сборках твэлов при охлаждении жидкими металлами, межканального обмена, моделирования смешения потоков с разной температурой.

Представлены данные исследований на натриевой модели крупномодульного парогенератора и на фрагментной свинцовой модели парогенератора с витыми трубками при докритическом и сверхкритическом давлении воды.

Результаты исследований на модели бака реактора на быстрых нейтронах с интегральной компоновкой демонстрируют, что воздействие термогравитационных сил приводит к температурному расслоению с застойными и рециркуляционными образованиями, внутренним волнам на стратифицированных границах раздела, пульсациями температуры, термической усталости конструкционных материалов и снижению сроков эксплуатации оборудования.

Определены кинетические и механические характеристики процесса деградации имитатора тепловыделяющей сборки активной зоны быстрых реакторов при термическом взаимодействии урансодержащих имитаторов топлива со статическим натрием и их зависимость от параметров и конструкции системы.

Изложены проблемы теплофизических исследований.

Список литературы

1. Ефанов А.Д., Козлов Ф.А., Рачков В.И., Сорокин А.П., Черноног В.Л. Научная школа ГНЦ РФ – ФЭИ «Тепло- и массоперенос, физическая химия и

технология теплоносителей в энергетических системах // Сборник «60-летие создания ТФ отдела ФЭИ». Обнинск: ОНТИ ГНЦ РФ – ФЭИ. 2014. С. 24–51.

2. **Кузина Ю.А., Сорокин А.П.** Теплофизика щелочных жидких металлов. Часть 1: теплогидравлика и безопасность (ретроспективно-перспективный взгляд) / Вопросы Атомной Науки и Техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2019. № 3. С. 210 – 232. Доступно на: <https://vant.ippe.ru/year2019/3/thermal-physics-hydrodynamics/1765-19.html>.

<https://vant.ippe.ru/en/year2019/3/thermal-physics-hydrodynamics/1787-19.html> (английская версия).

3. **Габрианович Б.Н., Дельнов В.Н.** Особенности гидродинамики проточных частей коллекторных систем теплообменников и реакторов ЯЭУ. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2016.

4. **Рачков В.И., Сорокин А.П., Жуков А.В.** Теплогидравлические исследования жидкометаллических теплоносителей в ядерных энергетических установках // Теплофизика высоких температур. 2017. Т. 56. № 1. С. 121 – 136.

5. **Oranassenko A.N., Sorokin A.P., Zaryugin D.G., Trufanov A.A.** Fast Reactor: an Experimental Study of Thermohydraulic Processes in Different Operating Regimes // Thermal Engineering. 2017. V. 64. No. 5. P. 336 – 344.

6. **Загорюлько Ю.И., Кащеев М.В., Жмурин В.Г., Ганичев Н.С.** Экспериментальные исследования повреждаемости оболочек твэлов в условиях потери расхода теплоносителя (натрий, вода) через топливную сборку // Сборник докладов научно-технической конференции «Теплофизика – 2011». Обнинск: ГНЦ РФ – ФЭИ. 2013. Т. 1. С. 148 – 157.

A.P. Sorokin, Yu.A. Kuzina, N.A. Denisova

State Scientific Center of the Russian Federation –
Leypunsky Institute for Physics and Power Engineering,
249033, Obninsk, Kaluga region, Bondarenko sq., 1

THERMAL HYDRAULIC RESEARCH OF THE LIQUID METAL COOLED FAST REACTORS (ACHIEVEMENT, RESEARCH PROBLEMS)

*В.В. Кузнецов*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1

ТЕПЛОФИЗИКА ФАЗОВЫХ И ХИМИЧЕСКИХ ПРЕВРАЩЕНИЙ НА МАЛЫХ И СВЕРХМАЛЫХ МАСШТАБАХ

Одной из основных причин, сдерживающих применение высокоэффективных энергетических установок в различных областях техники, является недостаточная изученность гидродинамики и теплопереноса на малых и сверхмалых масштабах [1]. Это связано с тем, что для достижения высокой энергоэффективности современного оборудования применяется микроструктурные поверхности теплообмена, которые позволяют достигать значительную интенсификацию тепло- и массопереноса. Для их обоснования необходимы надежные методы расчета гидродинамических и теплообменных процессов на малых и сверхмалых масштабах в различных условиях. В данной работе представлены результаты исследований теплофизики фазовых и химических превращений в малоразмерных системах, рассмотрено применение полученных результатов в технологиях сжижения природного газа, системах охлаждения, МЭМС и аппаратах водородной энергетики.

Представлены новые результаты в области гидродинамики и процессов теплообмена при фазовых превращениях в малоразмерных системах. Рассмотрена капиллярная гидродинамика газожидкостного течения в прямоугольных микроканалах, экспериментально установлена локальная структура течений, обсуждены новые подходы к расчету газожидкостных течений на малых масштабах. Установлены физические механизмы и методы управления процессами теплообмена при кипении и конденсации в компактных теплообменниках, предложены методы расчета теплообмена, учитывающие наличие сверхтонкой пленки жидкости на стенках каналов. Доказано, что направленная деформация поверхности пленки жидкости капиллярными силами и интенсификация теплообмена в окрестности контактной линии приводят к значительному увеличению коэффициентов теплоотдачи, численно установлено влияние сухих пятен и интенсификации теплообмена в окрестности контактной линии на коэффициенты теплоотдачи при кипении. Применительно к разработке микроканальных систем отвода тепла установлены физические механизмы и разработан метод расчета теплообмена при кипении недогретой и насыщенной жидкости в микроканалах и при микроструйном охлаждении теплонапряженной поверхности, учитывающий совместно вклад

вынужденной конвекции, подавления пузырькового кипения и испарения волновой пленки жидкости, предложены методы повышения критического теплового потока.

Рассмотрены особенности взрывного кипения метастабильной жидкости на микронагревателе при набросе тепловой нагрузки, направленные на обоснование МЭМС на основе управляемого распада жидкости. С использованием оригинальной оптической методики установлены характеристики пузырькового распада жидкостей и смесевых композиций при скорости роста температуры до 1ГК/с, разработан метод расчета зародышеобразования и роста паровых пузырей в наведённом ими поле давления, учитывающий неоднородность поля температуры и неравновесность фазового перехода. Приведены результаты экспериментального и численного исследования взрывного кипения на наноструктурированном нагревателе, разработаны методы управления взрывным фазовым переходом в микроразмерных системах.

Новым направлением в химической технологии является применение компактных реакторов-теплообменников. Рассмотрены многостадийные физико-химические превращения при конверсии углеводородов в обогащенный водородом синтез-газ в микроструктурных каталитических реакторах водородной энергетики. Установлена кинетика и полнота высокотемпературной конверсии природного газа, изучены механизмы и разработаны методы расчета химических превращений при неравновесной паровой конверсии углеводородов в неизотермических условиях, предложены методы интегрирования потоков тепла и продуктов реакции в топливных процессорах, сопряженных с топливными элементами.

Обсуждено применение полученных результатов для повышения энергоэффективности теплообменного оборудования в системах сжижения природного газа, устройствах охлаждения теплонапряженного оборудования, МЭМС на основе управляемого распада метастабильной жидкости, реакторов-теплообменников водородной и атомно-водородной энергетики.

Исследование выполнено за счет гранта Российского Научного Фонда (проект № 21-19-00626).

Список литературы

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

V. V. Kuznetsov

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS,
Russia, 630090 Novosibirsk, pr. Akademika Lavrentjeva, 1

**THERMOPHYSICS OF PHASE AND CHEMICAL
TRANSFORMATIONS ON SMALL AND ULTRA-SMALL SCALES**

¹ ФГБУВО Калужский Государственный университет им. К.Э. Циолковского
г. Калуга, 248023, ул. С. Разина, д. 26

² ЗАО НПВП Турбокон, г. Калуга, 248010, ул. Комсомольская роща, д. 43

ВОЗДУШНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ И СУХИЕ ГРАДИРНИ. НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Важнейший вопрос экологии – сохранение ресурсов пресной воды в ареолах обитания. В этом плане системы отвода тепла отработавшего пара тепловых электростанций играют очень важную и, как правило, негативную роль. Рассмотрим в порядке убывания экономичности три варианта схем: с воздушным конденсатором (ВКУ), смесительным конденсатором и сухой градирней (СВГ) и поверхностным конденсатором и сухой градирней. Во всех вариантах есть общие проблемы, которые нуждаются в решении:

- образование твердой фазы в трубах и каналах и разрушение поверхности теплообмена при низких наружных температурах;
- эффективность теплообмена на оребренных трубах с учетом технологии изготовления и термического сопротивления контакта ребро – стенка;
- образование зон пониженной эффективности при конденсации пара в параллельных каналах;
- теплообмен при встречном движении пара и конденсата и явление захлебывания;
- работа секционного ВКУ при неравномерном отводе тепла от секций;
- пуск, прогрев и останов в зимних условиях;
- интенсификация теплообмена со стороны воздуха в узких щелевых каналах межреберного пространства.

Все эти вопросы разной степени решены на воздушно-конденсационных установках и сухих вентиляторных градирнях тепловых электростанциях (ТЭС) России, и в частности, на ТЭС ООО «Газпром энергохолдинга». Первые в России воздушные конденсаторы работают на Верхне-Мутновской ГеоЭС, на Актюбинском ферросплавном заводе, на компрессорной станции «Чаплыгин». Сухие вентиляторные градирни в составе блоков ПГУ работают на Адлерской ТЭС, ТЭЦ-12 Мосэнерго, Серовской ГРЭС, Грозненской ТЭС и др.

Это сложные по конструкции и системе управления сооружения, их эксплуатация в климатических условиях России требует высокой квалифи-

кации стационарного персонала, а в ряде случаев – привлечения научных организаций для выявления негативных явлений и обеспечения надежности.

В качестве примера рассматриваем режимы работы натурной секции воздушного конденсатора при работе на различных оборотах вентилятора рис. 1.

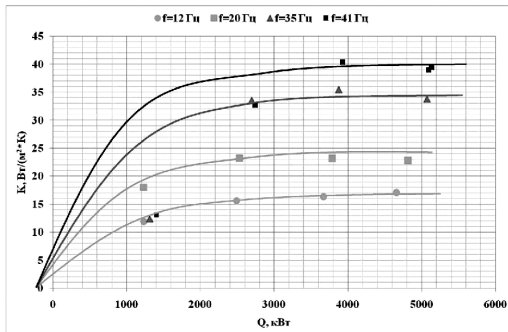


Рис. 1. График зависимости коэффициента теплопередачи ЭСВК от тепловой нагрузки и частоты вентилятора по ПЧ

Анализ этих процессов в сочетании с условиями работы ТЭС – важная часть научного и инженерного сопровождения этих работ.

Список литературы

1. **Федоров В.А., Мильман О.О.** Воздушно-конденсационные установки и сухие градирни, МГТУ им. Баумана. Изд-во Манускрипт, 2019. 388 с.
2. **Мильман О.О., Ананьев П.А.** Воздушно-конденсационные установки в тепловой энергетике (обзор), Теплоэнергетика, 2020. № 12. С. 15 – 36.
3. **Мильман О.О.** Сухие градирни и воздушно-конденсационные установки в тепловой энергетике, Информационно-аналитический бюллетень ПАО «Мосэнерго». Вып. 2. 2022. С. 3 – 46.

О.О. Milman^{1, 2}

¹ Joint Stock Scientific Production Company “Turbocon”

² Tsiolkovsky Kaluga State University

AIR CONDENSERS AND DRY COOLING TOWERS. PRESENT AND FUTURE OF HEAT-AND-POWER ENGINEERING

Д.А. Коновалов^{1,2}, М.В. Малеваный², Н.Н. Кожухов²

¹ ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 17

² ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»,
394020, г. Воронеж, 20-летия Октября, д. 84 *

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ОДНОФАЗНОМ ТЕЧЕНИИ ОХЛАДИТЕЛЯ В ПОРИСТОМ КАНАЛЕ С ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ГЕОМЕТРИЕЙ

Создание компактных теплообменников, работающих в условиях высоких удельных тепловых потоков является актуальной задачей, которая может быть успешно решена за счет использования пористых и микроканальных теплообменных элементов. Однако их использование связано с повышенными энергетическими затратами на прокачку теплоносителя по сравнению с гладкими каналами, поэтому одновременно решается задача достижения опережающего роста коэффициента теплоотдачи в теплообменниках с развитой поверхностью относительно коэффициента гидравлического сопротивления [1]. Данная задача может быть успешно решена применением теплообменников с изменяемой пористостью либо имеющих анизотропную структуру [2, 3]. Некоторые модели каналов представлены на рис. 1.

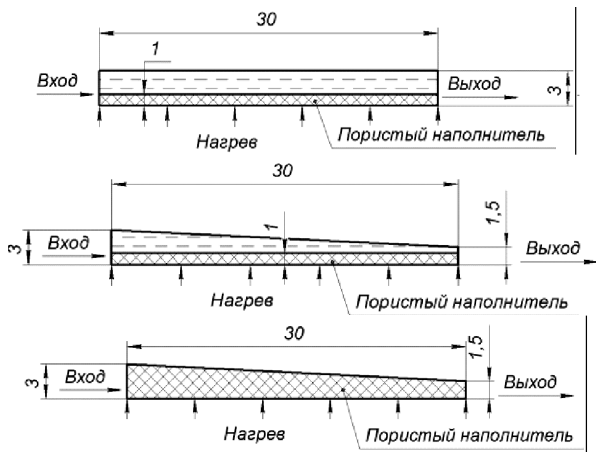


Рис.1. Расчетные модели пористых каналов

* Д.А. Коновалов, dmikonovalov@yandex.ru

В настоящей работе с помощью численного пакета Comsol были последовательно решены гидродинамическая и тепловая подзадача в двухтемпературной постановке при однофазном течении теплоносителя через пористый теплообменник частично или полностью заполненным пористой средой в канале переменного сечения.

На теплонапряженной поверхности задавался удельный тепловой поток 200 Вт/см^2 . В качестве матрицы рассматривалась пористая медь с пористостью 0,4, а в качестве теплоносителя рассматривалась вода с начальной температурой $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Расход теплоносителя варьировался в диапазоне $0,003 \dots 0,03 \text{ кг/с}$.

В результате были получены поля давлений, скоростей и температур для различной геометрии, а также при изменении расходов теплоносителя, определены максимальные значения поверхности нагрева для прогнозирования устойчивости работы системы и сделаны выводы об эффективности предлагаемых технических решений.

Список литературы

1. **Дзюбенко Б.В., Кузма-Кичга Ю.А., Леонтьев А.И., Федик И.И., Холпанов Л.П.** Интенсификация тепло- и массообмена на макро-, микро- и наномасштабах: монография / Б.В. Дзюбенко. М.: ФГУП «ЦНИИАТОМИНФОРМ». 2008. 532 с.
2. **Ряжских В.И., Келлер А.В., Ряжских А.В., Николенко А.В., Дахин С.В.** Математическая модель разгонного ламинарного течения ньютоновской жидкости в анизотропном пористом канале прямоугольного сечения // Вестник ЮУрГУ. Серия: Математическое моделирование и программирование. Т. 13. № 3, 2020. С. 17 – 28.
3. **Коновалов Д.А., Кожухов Н.Н., Ряжских В.И.** Однофазный конвективный теплообмен в каналах энергетических установок, заполненных анизотропной пористой средой // XXXVIII Сибирский теплофизический семинар, Новосибирск, 29 – 31 августа 2022 г. Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 2022. С. 121

D.A. Konovalov^{1,2}, M.V. Malevaniy², N.N. Kozhukhov²

¹ National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,
Russia 111250 Moscow, Krasnokazarmennaya, 17

² Voronezh State Technical University,
Russia, 394020, Voronezh, 20-let Oktyabrya, 84

**NUMERICAL SIMULATION OF HEAT TRANSFER DURING
SINGLE-PHASE FLOW OF A COOLER IN A POROUS CHANNEL
WITH A CHANGING GEOMETRY**

С.Л. Соловьев¹, Д.С. Соловьев²

¹ Акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций»,
109507, г. Москва, ул. Ферганская, д. 25*

² Акционерное общество «Прорыв»,
107140, г. Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8к7

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕПЛООБМЕНА В АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Процессы теплообмена играют определяющую роль в реакторных установках (РУ), парогенераторах, системах безопасности. Действительно, с нейтронно-физической точки зрения, удельная мощность РУ может быть сколько угодно большой. Рост мощности ограничен только достижимым уровнем теплообмена в активной зоне. Если отвод теплоты будет недостаточно интенсивным, то ядерное топливо может расплавиться и произойдет выброс радиоактивных продуктов. Далее, в случае неудовлетворительного теплообмена в системах безопасности и локализации аварии, окружающая среда может подвергнуться значительному радиоактивному заражению.

Конкуренция атомной энергетики с другими способами производства энергии требует снижения стоимости электроэнергии при сохранении или даже повышении уровня безопасности. Постоянно идет работа по созданию реакторов нового поколения (с 2000 г. мировое сообщество работает над реакторами четвертого поколения [1]), оптимизации и совершенствованию РУ, систем безопасности (активно внедряются пассивные системы), топливного цикла. Увеличиваются КПД и экономичность, удельная мощность, продолжительность топливной кампании, глубина выгорания топлива, срок службы РУ. Значительно расширяется спектр используемых материалов, топливных композиций, теплоносителей и т.д. Увеличивается диапазон рабочих параметров теплоносителя и материалов РУ (давление, температура, плотность). Например, в реакторах 4-го поколения, в качестве теплоносителя предлагается использовать следующие вещества: натрий, свинец и его сплавы, жидкие соли, гелий, воду и двуокись углерода сверхкритических параметров. Диапазон давлений до 25 МПа, температур 280÷1000 °С, плотности 1÷11000 кг/м³. Соответственно, в случае аварии могут происходить высокоинтенсивные, неравновесные процессы теплообмена, так как параметры теплоносителя зна-

*С.Л. Соловьев, sergeysoloviev@rambler.ru

чительно отличаются от параметров окружающей среды. Поэтому, при совершенствовании существующих и создании новых РУ не всегда можно провести достоверный расчет теплообмена на основе уже известных данных и рекомендаций. Для получения необходимых данных часто требуется проведение значительных дополнительных расчетных и экспериментальных исследований. В качестве первого шага следует четко определить пределы применимости имеющихся данных и методов расчета.

Например, большое количество данных по теплообмену в условиях свободной конвекции получено на электрообогреваемых (при граничных условиях второго рода) трубках небольшого диаметра. Возникает вопрос о правомерности их применения для расчета процессов в контайнменте, системах пассивного отвода теплоты (СПОТ) и т.д. где реализуются граничные условия первого рода, а характерные линейные размеры могут достигать десятков метров.

В докладе рассмотрены проблемы теплообмена, возникающие на действующих и проектируемых АЭС. Проанализированы: вопросы кризиса теплообмена в топливных сборках, проблемы теплообмена в контайнменте, возможности внутрикорпусного удержания расплава в случае тяжелой аварии путем надлежащего охлаждения внешней поверхности корпуса, проблемы теплообмена в реакторах четвертого поколения.

Список литературы

1. A Technology Road Map for Generation IV Nuclear Energy Systems//Generation IV International Forum, GIF-002-00, December 2002, http://nuclear.inl.gov/gen4/docs/iv_roadmap.pdf/

S.L. Soloviev¹, D.S. Solovyev²

¹ JS “VNIIAES”,

Russia 109507 Moscow, Ferganskaya st., 5

² Joint Institute of High Temperature,

Russia, 107140 Moscow, Malaya Krasnoselskaya st., 2/8-7

SOME PROBLEMS OF HEAT TRANSFER IN NUCLEAR POWER

*Б.В. Кичатов*Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН
119991, г. Москва, Ленинский просп., д. 53, стр. 4*

МИКРО И НАНОМОТОРЫ

В докладе рассматриваются вопросы, связанные с различными механизмами движения микро и наномоторов. Помимо известных механизмов, связанных с электрофорезом, диффузофорезом и ряда других явлений, здесь рассматривается новый механизм движения микророботов, который условно можно назвать «химическим магнетизмом». Одним из видов микромоторов являются активные капли. Под активными эмульсиями понимаются многофазные системы, где капли диспергированные в сплошной фазе, способны самостоятельно двигаться за счет потребления «топлива» из окружающей среды или посредством преобразования энергии магнитного поля в кинетическую энергию. В докладе рассматриваются вопросы образования двумерных кристаллов в активной эмульсии, анализируется закон кинетики кристаллизации в активной материи, который, по своей сути, является аналогом закона кристаллизации Вильсона-Френкеля. Представлены результаты по самоорганизации активных капель в вихревые структуры и перемещению пассивных капель с помощью активных. Анализируются диссипативные структуры, связанные с возвратно-поступательным движением капель в эмульсии при протекании в системе химических реакций, а также задача перемещения капель в эмульсии с помощью магнитных наночастиц.

Список литературы

1. **Kichatov B., Korshunov A.** at al. Gas generation due to photocatalysis as a method to reduce the resistance force in the process of motors motion at the air-liquid interface // *Journal of Colloid and Interface Science* 2022. Т. 627. P. 774-782.
2. **Kichatov B., Korshunov A.** at al. Motion of a chemically reactive bimetal motor in a magnetic field // *Physical Chemistry Chemical Physics* 2022. Т. 24. P. 19693-19696.
3. **Kichatov B., Korshunov A.** at al. Magnetic nanomotors in emulsions for locomotion of microdroplets // *ACS Applied Materials & Interfaces* 2022. Т. 14. P. 10976-10986.

* Б.В. Кичатов, b9682563@yandex.ru (E-mail одного из авторов)

4. **Kichatov B., Korshunov A.** et al. Superfast active droplets as micromotors for locomotion of passive droplets and intensification of mixing // ACS Applied Materials & Interfaces 2021. T. 13. P. 38877-38885.

5. **Kichatov B., Korshunov A.** et al. Oscillating motion of oil droplets in the emulsion near the air-water interface // The Journal of Physical Chemistry B 2021. T. 125. P. 10373-10382.

6. **Kichatov B., Korshunov A.** et al. Crystallization of active emulsion // Langmuir 2021. T. 37. P. 5691-5698.

7. **Kichatov B., Korshunov A.** et al. Self-Organization of active droplets into vortex-like structures // Langmuir 2021. T. 37. P. 9892-9900.

8. **Kichatov B., Korshunov A.** et al. Kinetics of cluster formation in active suspension: Coarsening regime // The Journal of Chemical Physics 2020, T. 153. P. 084902.

B.V. Kichatov

P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences
Russia, 119991, Moscow, Leninsky prosp., 53

MICRO AND NANOMOTORS

*Е.В. Панкратов*Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова,
163002, г. Архангельск, Набережная Северной Двины, д. 17**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАЧАЛЬНОЙ ЗАКРУТКИ
ПОТОКА НА ФОРМИРОВАНИЕ ВТОРИЧНЫХ ВИХРЕЙ
В КОЛЬЦЕВЫХ КАНАЛАХ
С НЕПОДВИЖНЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ**

В большинстве работ, посвященных исследованию вторичных течений по типу вихрей Тейлора, которые образуются в кольцевых каналах, изучаются различные случаи вращающихся цилиндрических поверхностей. Кроме того, рядом авторов широко рассмотрено влияние осевого потока на интенсификацию теплообмена в кольцевых каналах с вращающимися поверхностями [1]. Данная работа показывает, что возникновение тороидальных вторичных вихрей с противоположным вращением, подобных вихрям Тейлора, может происходить с неподвижными поверхностями кольцевого канала при начальной закрутке потока в аксиально-лопаточном завихрителе.

Исследуемый кольцевой канал образован внутренней поверхностью с диаметром $d_1 = 130$ мм внешней с диаметром $d_2 = 172$ мм. Закрутка потока осуществляется лопаточным завихрителем с 30 поворотными лопастями. Длина канала L равна 1000 мм. Численное моделирование осуществлялось в трехмерной постановке с использованием программного комплекса ANSYS Fluent 15,0 с моделью турбулентности Shear Stress Transport $k-\omega$ и поправкой на кривизну линий тока. Верификация результатов численного моделирования аэродинамики и теплоотдачи осуществлялась на опытных данных, полученных на физической модели прямого кольцевого канала с аналогичными геометрическими размерами. Аэродинамические характеристики в физическом эксперименте были исследованы с применением оптических методов лазерной доплеровской анемометрии. Теплообмен исследовался на обеих поверхностях канала датчиками теплового потока.

Для случая, когда движение жидкости в кольцевом канале создается только вращением потока жидкости при неподвижных поверхностях кольцевого канала число Тейлора можно записать в следующем виде:

где $\delta = R_1 - R_2$ – расстояние между цилиндрами; $R_{cp} = R_1 + R_2 / 2$ – средний радиус; $j = \omega^2 R_{cp}$ – центростремительное ускорение; $\omega = \omega_\phi / R_{cp}$ – угловая

скорость; ω_φ – тангенциальная составляющая скорости; ν_φ – кинематический коэффициент вязкости.

На рис. 1 приведено распределение радиальной составляющей скорости при $Re_{вх} = 4 \cdot 10^3$ и $Ta_{вх} = 1,2 \cdot 10^6$.

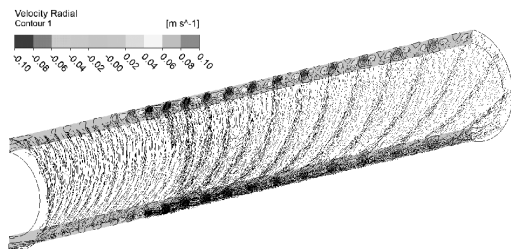


Рис. 1. Распределение радиальной составляющей скорости

На начальном участке кольцевого канала происходит потеря устойчивости, которая приведет к образованию вторичных вихрей по типу вихрей Тейлора. Стоит отметить, что по мере продвижения потока к выходному сечению интенсивность вторичных течений снижается по длине за счет раскрутки потока и увеличения осевой составляющей скорости. При этом также снижается число Тейлора.

Из вышеизложенного следует, что при определенных условиях в кольцевом канале с аксиально-лопаточным завихрителем может образоваться торoidalные вторичные вихри, подобные вихрям Тейлора. При этом как показано в предыдущих работах вторичные вихри могут значительно влиять на интенсификацию теплообмена. Дальнейшие исследования позволяют определить оптимальные параметры начальной закрутки для управления образованием вторичных течений в кольцевых каналах с неподвижными поверхностями.

Список литературы

1. **Fénot, M.** A review of heat transfer between concentric rotating cylinders with or without axial flow / M. Fénot, Y. Bertin, E. Dornigac, G. Lalizel // International Journal of Thermal Sciences – INT J THERM SCI. – 2011. – Т. 50 – С. 1138 – 1155 – doi:10.1016/j.ijthermalsci.2011.02.013.

E. V. Pankratov

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Russia,
163002 Arkhangelsk, Severnaya Dvina Emb., 17

**INVESTIGATION OF THE INITIAL SWIRLING FLOW'S INFLUENCE
ON THE FORMATION OF SECONDARY VORTEX IN ANNULAR
CHANNELS WITH STATIONARY SURFACES**

О.В. Митрофанова^{1,2}

¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
115409, г. Москва, Каширское ш., д. 31

² Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1*

ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В СЛОЖНЫХ КАНАЛАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Рассмотрен механизм саморегулирования топологии вихревого движения теплоносителей и рабочих сред в замкнутых циркуляционных контурах энергетических установок. Показано, что вихревая структуризация потока, связанная с преодолением кризиса термодинамической устойчивости течения, приводит к генерации низкочастотных и инфразвуковых акустических колебаний в сложных гидромеханических системах.

Явление самоорганизации крупномасштабной вихревой структуры потока можно рассматривать как естественную возможность преодоления кризиса течения без ударно-волновых эффектов. Поэтому оно является достаточно общим как для сложных технических систем – ядерных реакторов, парогенераторов, теплообменников и т.д., так и для геофизических процессов.

В данной работе механизм возбуждения низкочастотных акустических колебаний в каналах сложной геометрии рассмотрен на основе аналогии перехода звукового барьера в сопле Лаваля с преодолением кризиса закрученного потока в элементах оборудования ядерных энергетических установок.

В работе [1] были определены условия, при которых в канале переменного сечения (сопле Лаваля) может быть осуществлено течение газа с возрастающей скоростью и непрерывным переходом через её критическое значение от дозвукового к сверхзвуковому значению. Такими условиями являются достаточно большой перепад давления, при котором происходит истечение газа через сопло, достижение скорости звука в наименьшем сечении сопла и дальнейшее ускорение потока в расширяющейся части сопла. Режим непрерывного течения без ударно-волновых эффектов, характеризующийся сверхзвуковой скоростью и равенством давления внешней среды и давления в выходном сечении сопла, называется расчетным. В этом случае на выходе из диффузорной части сопла формируется газовая струя постоянного сечения, давление в которой равно давлению внешней среды.

*О.В. Митрофанова, omitr@yandex.ru

В предпринятом исследовании кризиса закрученного потока, проявление которого рассмотрено в работе [2] на примерах моделирования процессов гидродинамики и теплообмена в трубопроводных системах энергооборудования судово ядерной энергетической установки, было установлено, что кризисный и закризисный режимы течения выявляется не только по наличию рециркуляционной зоны за диффузорным расширением канала с ярко выраженной крупномасштабной вихревой структурой (рис. 1), но и сопровождаются генерацией низкочастотных акустических колебаний.

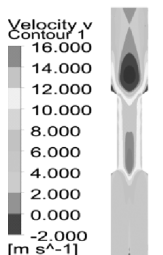


Рис. 1. Распределение продольной скорости закрученного потока в канале переменного сечения при закризисном течении теплоносителя с образованием зоны реверсивной циркуляции (вихревой пробки). Течение направлено снизу вверх

Возможность реализации безударного закризисного режима течения закрученного потока в данном случае обеспечивается теми же термодинамическими условиями, которые необходимы для осуществления расчетного режима течения в сопле Лавалья. Об этом можно судить по картине скоростного распределения за вихревой пробкой. Причем здесь роль управления изменением проходного сечения канала в отличие от жесткой конструкции в сопле Лавалья играет сама пробка, поперечные размеры которой изменяются в зависимости от нагнетаемого расхода.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда: грант РФФ № 23-29-00373, <http://rscf.ru/project/23-29-00373>.

Список литературы

1. Новиков И.И. Термодинамика. М.: Машиностроение. 1984. 592 с.
2. Митрофанова О.В., Байрамуков А.Ш., Илев О.А., Ургенов Д.С., Федоринов А.В. Исследование влияния вихревых потоков на элементы ЯЭУ / ВАНТ: Серия: ядерно-реакторные константы. Вып. 4. 2021. С. 72 – 81.

O. V. Mitrofanova^{1,2}

¹National Research Nuclear University MEPHI,
Russia, 115409, Moscow, Kashirskoesh., 31

²National Research Center «Kurchatov Institute»,
Russia, 123182, Moscow, pl. Academician Kurchatov, 1

HYDRODYNAMIC EXCITATION OF LOW-FREQUENCY ACOUSTIC OSCILLATIONS IN COMPLEX CHANNELS OF POWER INSTALLATIONS

А.А. Черноз^{1,2}¹ Новосибирский государственный университет,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, д. 2² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, д. 1

КИНЕТИКА ДЕГАЗАЦИИ ВЫСОКОВЯЗКОГО ГАЗОНАСЫЩЕННОГО РАСПЛАВА ПРИ ЕГО ДЕКОМПРЕССИИ

Уже несколько десятилетий внимание исследователей привлекает проблема вулканических извержений. Это, прежде всего, связано с необходимостью прогноза и определения степени потенциальной опасности того или иного вулкана. Кроме того, физические процессы, происходящие при вулканическом извержении, представляют собой фундаментальный интерес. 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 констатировать только факты фазовых переходов по конечным образцам затвердевшей магмы, а также разрушение изначально сплошного магматического потока по структуре выброса. Поэтому последовательное построение моделей течения магмы в канале вулкана и исследование динамики различных режимов вулканических извержений методами механики многофазных сред с целью понимания механизмов, определяющих тип и характер извержения, а также интерпретации данных полевых наблюдений, представляется актуальным.

В теоретических и экспериментальных постановках по моделированию вулканических извержений следует обратить внимание на следующие проблемы: особенность формирования трехфазного состояния магмы при ее декомпрессии; эволюцию структуры магмы при ее подъеме по каналу вулкана; динамику разрушения вспененной и частично закристаллизованной магмы (процесс фрагментации с образованием газовзвеси); влияние реологии магмы на структуру потока и общую динамику извержения в целом. Надо отметить, что все эти задачи чрезвычайно сложны для теоретического и экспериментального исследования, и каждая из них представляет отдельную проблему.

В настоящей работе рассматриваются вопросы нуклеации и роста газовых пузырьков в пересыщенном в результате быстрой декомпрессии магма-

тическом расплаве. Представлена математическая модель роста пузырька, учитывающая как динамические, так и диффузионные эффекты, включающая в себя известные классические уравнения – уравнение импульсов и уравнение диффузии, записываемые с учетом процесса десорбции газа на межфазной границе. Отдельное внимание уделено эффекту бародиффузии, который может быть существенен при определенных условиях. 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 системе обыкновенных дифференциальных уравнений. Полученное 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 (в работе [2] такое решение найдено для случая мгновенной декомпрессии; аналогичное решение для роста парового пузырька в перегретой жидкости можно найти в работе [3]). Получено, что длительность переходной стадии существенно зависит от скорости декомпрессии, так как на определенной стадии процесса преобладающими могут являться различные факторы, влияющие на процесс. Показано, что на больших временах решение становится точным авторитетным, а рост пузырька определяется исключительно диффузией.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-19-00092).

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. № 11. P. 116602.
2. **Chernov A.A. et al.** Gas nucleus growth in high-viscosity liquid under strongly non-equilibrium conditions // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2018. V. 123. P. 1101-1108.
3. **Chernov A.A. et al.** New semi-analytical solution of the problem of vapor bubble growth in superheated liquid // *Sci. Rep.* 2020. V. 10. № 1. P. 16526.

A.A. Chernov^{1,2}

¹ Novosibirsk State University,
630090, Novosibirsk, Pirogova str., 2

² Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS,
630090, Novosibirsk, Prosp. Acad. Lavrentyeva, 1

KINETICS OF DEGASSING OF A HIGHLY VISCOUS GAS-SATURATED MELT DURING ITS DECOMPRESSION

*В.И. Терехов*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, д. 1***АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ КОНВЕКТИВНОГО
ТЕПЛООБМЕНА. ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА**

Настоящий доклад посвящен памяти выдающегося теплофизика академика А.И. Леонтьева, внесшего огромный вклад в развитие теории теплообмена. В начале 60-х годов прошлого столетия им, совместно с С.С. Кутателадзе, была разработана асимптотическая теория турбулентного пограничного слоя [1], позволившая решить широкий круг задач пристенного теплообмена при наличии сложных граничных условий [2]. Создана теория и методы инженерных расчетов теплообмена неизотермических, сжимаемых и градиентных течений, в том числе и при наличии поперечного потока вещества на стенке.

Идея пограничного слоя с исчезающей вязкостью ($Re \rightarrow \infty$) оказалась чрезвычайно плодотворной при решении задач гетерогенного и гомогенного горения в пограничном слое [3, 4], а также при наличии фазовых переходов (испарение и конденсация). Подобные подходы были использованы при анализе течений при воздействии массовых сил на турбулентность: обтекание криволинейных поверхностей, закрученные потоки в трубах, вращающиеся каналы, пристенные закрученные струи, вихревая стабилизация плазмы, циклонные камеры и др. [5]. Созданный научный задел данного направления науки был активно использован при создании нового энергетического оборудования, эффективных теплообменных устройств, вихревых аппаратов для химической промышленности и сельского хозяйства [6].

Современные тенденции развития энергетики, авиационно-космической техники, микроэлектроники и других ключевых направлений технологического развития экономики РФ требуют совершенствования методов интенсификации теплообмена или в более общем случае управления процессами переноса. При этом важным трендом является миниатюризация теплообменных устройств, что приводит к огромным уровням тепловых потоков.

В докладе рассматривается отечественная история развития науки о теплообмене, ее современное состояние и наиболее важные задачи на перспективу. Процессы интенсификации теплообмена не теряют своей актуально-

сти уже более века. Интерес к данной проблеме будет только возрастать и, особенно в вычислительном плане, учитывая мощное развитие компьютерной техники. Рост теплоотдачи в теплообменниках осуществляется, как правило, за счет создания отрывных зон [7]. По этой причине экспериментальные исследования физики отрывных и вихревых потоках будут активно развиваться с использованием самых современных методов диагностики.

Большие потенциальные возможности имеют активные способы воздействия на процессы теплообмена. К таковым можно отнести пульсирующие течения в каналах при организации резонансных эффектов, в импульсных и синтетических струях и спреях и их систем с возможностью реализации интеллектуальных методов управления.

Работа выполнена при поддержке РФФ (проект 21-19-00162) и мегагранта № 075-15-2021-575.

Список литературы

1. Турбулентный пограничный слой сжимаемого газа / С.С. Кутателадзе, А.И. Леонтьев. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1962. 180 с.
2. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое / С.С. Кутателадзе, А.И. Леонтьев. М.: Энергоатомиздат, 1985. 320 с.
3. Пристенные газовые завесы / Э.П. Волчков. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1983. 240 с.
4. **Terekhov V.I.** Heat and Mass Transfer on Permeable Surface with Phase Transitions and Chemical Reactions // Heat Transfer Research. 1992. V. 24, No. 2. P.139-171.
5. Аэродинамика и тепломассообмен в органиченных вихревых потоках / Кутателадзе С.С., Волчков Э.П., Терехов В.И. Новосиб: Изд. ИТ СО АН СССР, 1987, 290 с.
6. Вихревые технологии для энергетики / А.И. Леонтьев, Э.П. Волчков, С.В. Алексеенко и др. М.: Издательский дом МЭИ, 2016. 328 с.
7. Heat Transfer in Subsonic Separated Flows / V.I. Terekhov, A.Yu. Dyachenko, Ya.J. Smulsky, T.V. Bogatko, N.I. Yarygina. Springer Nature, Switzerland AG, 2022, 230 p.

V.I. Terekhov

Kutateladze Institute of Thermal Physics SB RAS,
Russia, 630090, Novosibirsk, Lavrentiev Ave., 1

**ACTUAL PROBLEMS OF CONVECTIVE HEAT TRANSFER.
YESTERDAY, TODAY, TOMORROW**

*Г.В. Кузнецов¹*¹Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30 *

ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ВОЗГОРАНИЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА

Число пожаров на территории России в последние годы не уменьшается, а ущерб от пожаров растет, несмотря на большие усилия МЧС РФ по обеспечению пожарной безопасности объектов и быстрого подавления горения в случае возгораний. Но система борьбы с пожарами в случае их возникновения включает два основных мероприятия. Первое – обнаружение возгорания, второе – подавление или локализация горения. Обнаружение возгораний происходит в большинстве случаев уже на стадии пламенного горения, когда для ликвидации пожара необходимо применение специальной техники и средств борьбы с огнем. В этом случае после ликвидации пожара ущерб, размеры которого во многом определяются продолжительностью горения до начала применения средств пожаротушения, может быть велик.

В последние годы усилия многих исследователей направлены на разработку методов и средств раннего обнаружения возгораний. Наиболее эффективно подавление горения на его ранней стадии, которое специалисты МЧС часто называют «задымлением» [1]. Физически эту стадию можно квалифицировать как процесс термического разложения горючих материалов (в случае энергетических установок это, как правило, полимерные гомогенные или полимерные композитные материалы) с образованием газообразных (в большей степени) и твердых (в меньшей степени) продуктов. Эти продукты (на первой стадии газообразные играют основную роль) являются горючим, которое при взаимодействии с кислородом воздуха генерирует выделение теплоты, которая в конечном итоге и создает условия для устойчивого горения. Но для того, чтобы начался процесс горения необходимо, чтобы температура горючих газов и их концентрация достигли начально необходимых значений. Т.е. период, как пишут некоторые исследователи, термической подготовки (или другими словами индукционный период) продолжается некоторый период времени, продолжительность которого зависит от группы факто-

*Г.В. Кузнецов, kuznetsovgv@tpu.ru

ров. Наиболее значимыми являются интенсивность выделения теплоты источником нагрева, инициирующее горение; температура воздуха внешней среды; теплофизические и термокинетические свойства горючих материалов; механизм переноса горючих газов (молекулярная или конвективная диффузия). Но в любом случае продолжительность индукционного периода времени от начала нагрева горючего материала до начала горения составляет десятки секунд как минимум, чаще всего это минуты. По этим причинам регистрация процесса притока горючих газов до возникновения их горения является эффективным способом кардинального снижения времени реакции систем пожаротушения и, соответственно, ущерба от пожара.

Для обоснования возможности такого кардинального повышения эффективности борьбы с пожарами на производстве и на социальных объектах необходимы сведения о закономерностях образования и распространения горючих газов в типичных условиях нагрева горючих материалов источника теплоты.

В лекции приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований, ориентированных на установление полей концентраций горючих газов, образующихся при интенсивном нагреве полимерных (гомогенных и композиционных) материалов, использующихся при изготовлении энергетических установок. Приведены описания экспериментальных методик, стендов, постановок задач и методов их решения. Рассмотрены достаточно типичные условия работы энергетических установок и возможные источники нагрева, инициирующие возгорание. Установлена возможность регистрации начала стадии возгорания конструкционных материалов, использующихся при изготовлении энергетических установок. Также показано, что для решения задач ранней регистрации возгораний необходима работа по модернизации газовых сенсоров.

Список литературы

1. Кротова С.С., Кузнецов Г.В., Дорохов В.В. Оценка эффективности ранней идентификации возгораний материалов по результатам регистрации газообразных продуктов пиролиза // Пожарная безопасность. 2022. № 3 (108). С. 17 – 28.

*G. V. Kuznetsov*¹

¹ Tomsk Polytechnic University,
Russia 634050 Tomsk, Lenin Avenue, 30

SUBSTANTIATION OF THE POSSIBILITY OF REGISTERING THE INITIAL STAGE OF FIRES OF STRUCTURAL MATERIALS BASED ON THE RESULTS OF THE ANALYSIS OF HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES

*П.Г. Фрик*¹

¹ Институт механики сплошных сред УрО РАН,
614018, г. Пермь, академика Королева, д. 1

ДИНАМИКА И ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В КОНВЕКТИВНЫХ СИСТЕМАХ С ПЛАВАЮЩИМИ ТЕЛАМИ

В лекции обсуждаются особенности конвективных течений в замкнутых объемах и слоях жидкости при наличии в них свободноплавающих тел. Задачи такого рода возникают в основном в контексте гео- и астрофизических приложений – плавающие континенты, ледовые массы, облачные кластеры, активные зоны в конвективных оболочках звезд, но представляют интерес и в ряде промышленных приложений.

Поведение конвективных систем с плавающими телами сильно зависит от конкретной геометрии полости и плавающего тела, теплофизических свойств тела, граничных условий на стенках полости и самого тела. Поэтому, для изучения особенностей поведения систем такого рода нужны простые (пусть академические) задачи, позволяющие разобраться с основными закономерностями в динамике таких систем. В качестве базовых рассматривается задача о движении теплоизолирующего поплавка на поверхности конвективного слоя, либо задача о свободно плавающем теплоизолирующем диске, который перемещается в полости с жидкостью (или в слое со свободной верхней поверхностью) на строго фиксированной глубине. Экспериментальные и численные исследования систем, в которых диск допускает только движения вдоль одной координаты, показали, что при заданной геометрии полости и диска поведение диска определяется двумя управляющими параметрами - числом Релея, отвечающим за интенсивность конвекции в слое, и относительной глубиной погружения диска. На плоскости этих двух параметров можно построить карту режимов, которая включает область отсутствия движений диска, область регулярных периодических перемещений диска из одного крайнего положения в другое и область хаотических (одномерных) блужданий диска. Изучено влияние неподвижного и подвижного тела на эффективный теплообмен (число Нуссельта) и на структуру возникающих конвективных течений.

При увеличении размерности пространства, в котором перемещается тело, набор возможных режимов становится еще более разнообразным. Представлены результаты исследования движения диска в тонком квадратном в плане, подогреваемом снизу слое жидкости. Показаны результаты, получен-

ные при различных способах подогрева дна и различных теплофизических свойствах самого диска. Проведенные восстановления полей скорости и температуры, а также фазовые траектории, описывающие блуждания диска в конвективном слое свидетельствуют о сложном многомасштабном течении жидкости. Приведены интегральные характеристики теплопереноса и статистические характеристики мелкомасштабного турбулентного движения жидкости.

Работа выполнена за счет РНФ в рамках проекта 22-61-00098.

*P.G. Frick*¹

¹ Institute of Continuous Media Mechanics,
Russia 614018 Perm, akademik Korolyov, 1

**DYNAMICS AND HEAT AND MASS TRANSFER
IN CONVECTIVE SYSTEMS WITH FREE-FLOATING BODIES**

*А.Н. Павленко*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, д. 1 ***НОВЕЙШИЕ ДОСТИЖЕНИЯ И НЕРЕШЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ
В ИЗУЧЕНИИ КРИЗИСНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ КИПЕНИИ**

В лекции представлен анализ существующих модельных подходов к описанию критического теплового потока при пузырьковом кипении в условиях свободной конвекции, современных достижений и нерешенных проблем в изучении кризисных явлений при кипении. В настоящее время наблюдается значительный рост исследований кризисных явлений при кипении в различных гидродинамических условиях (в условиях свободной конвекции; при пленочных течениях жидкости, включая орошение пакетов труб; в тонких горизонтальных слоях жидкости; при спреино/струйном орошении и при вынужденном течении в каналах и мини/микроканалах), что обусловлено высокой практической значимостью результатов этих многоплановых исследований для целого ряда традиционных и новых приложений, а также новыми возможностями/успехами в материаловедении и в развитии современной экспериментальной техники. Такие исследования осуществляются преимущественно в рамках физического моделирования, поскольку и на сегодняшний день построение физически строго обоснованных подходов к описанию кризисных явлений в значительной степени ограничено необходимостью использования целого ряда допущений и задания большого количества эмпирических констант.

В докладе изложены соображения по возможности реализации механизма, определяющего наступление кризиса пузырькового кипения вследствие развития неустойчивости Ландау на межфазной поверхности при интенсивном испарении в ансамбле микропленок жидкости, впервые представленные автором в [1]. Результаты новейших исследований, в частности, представленные в [2], показывают, что относительная доля смоченной поверхности, амплитуда и частотный спектр ее пульсаций перед наступлением кризиса, и, как следствие, величина критической плотности теплового потока, в существенной мере зависят от контактного угла смачивания жидкостью теплоотдающей поверхности.

Проводимый в докладе анализ наглядно показывает, что для надежного обоснования физических допущений, используемых при разработке об-

* А.Н. Павленко, pavl@itp.nsc.ru

суждаемой автором модели, необходимы более глубокие и систематические исследования структуры двухфазного слоя у теплоотдающей поверхности, его постадийной эволюции при приближении к критическому тепловому потоку. Отмечено, что в этой связи принципиально важным является вопрос о нахождении зависимости относительной доли смоченной поверхности (с учетом нестационарности процесса) от теплового потока при различных приведенных давлениях и варьировании смачивающих свойств теплоотдающей поверхности, температуропроводности и толщины стенки нагревателя. Необходимо выявить закономерности структурообразования, динамики поведения характерных пространственных и временных масштабов для эволюционирующего ансамбля микропленок, укрупняющихся «сухих» пятен в макрослое на теплоотдающей поверхности. Ответы на эти ключевые вопросы дадут необходимую, но недостаточную в настоящее время информацию для построения наиболее обоснованной и полной (по многостадийности и многообразию реализации различных физических механизмов развития переходных процессов) теории кризисов при пузырьковом кипении жидкости, важной и для предсказания, разработки наиболее эффективных методов интенсификации теплообмена при кипении с использованием микро- и наноструктурирования теплоотдающей поверхности, созданием на ней различных иерархических структур, контрастной смачиваемости и т.д.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН (проект № 121031800216-1: блок по сравнительному анализу расчетных соотношений для критического теплового потока при кипении), блок по моделированию кризиса кипения при пузырьковом кипении выполнен при финансовой поддержке мегагранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (номер соглашения № 075-15-2021-575).

Список литературы

1. **Павленко А.Н.** О физике развития кризисных явлений при кипении // Теплоэнергетика. 2020. № 11. С. 86 – 94.
2. **Kim H., Kim D.E.** Effects of surface wettability on pool boiling process: Dynamic and thermal behaviors of dry spots and relevant critical heat flux triggering mechanism // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2021. Vol. 180. No. 121762. 18 p.

A.N. Pavlenko

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk,
630090, Lavrentiev ave., 1.

**THE LATEST ACHIEVEMENTS AND UNSOLVED PROBLEMS
IN THE STUDY OF CRISIS PHENOMENA DURING BOILING**

А.В. Ненарокомов¹

¹ Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет),
125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4 *

ОПТИМАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДОВ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ТЕПЛООБМЕНА

Представлены результаты апробации предлагаемой методики проектирования для анализа эффективности практического применения различных геометрических форм экранов тепловой защиты лунного возвращаемого космического аппарата (КА).

Параметрическая идентификация математических моделей теплопереноса заключается в определении неизвестных характеристик (параметров) математической модели по результатам измерений некоторых функций от переменных состояния (например, ЭДС термопары как функция температуры). При этом возникает задача оценивания характеристик рассматриваемой системы (то есть причинных характеристик) по результатам косвенных измерений состояния системы (то есть следствия). Подобные задачи получили название обратных задач теплообмена, при этом нарушение причинно-следственных связей в постановке задачи приводит к математической некорректности подобных задач. В целом обратную задачу можно рассматривать как некоторый эксперимент, конечной целью которого является получение количественной информации о неизвестных характеристиках математической модели. При решении некорректных обратных задач качество эксперимента, по видимому, наиболее целесообразно оценивать с помощью критерия, отражающего вычислительные особенности задачи. При этом для повышения точности решения и достоверности результатов могут быть использованы методы математической теории оптимального эксперимента. Оптимальным планированием тепловых экспериментов применительно к задачам идентификации называется выбор такой совокупности условий проведения эксперимента (плана эксперимента), который обеспечивает наилучшую обусловленность алгоритма решения соответствующей задачи обработки экспериментальных данных (обратной задачи теплообмена). На основе методов оптимального планирования экспериментов могут быть сформулированы требования к эксперименталь-

* А.В. Ненарокомов, aleksey.nenarokomov@mai.ru

ным образцам, условиям проведения и параметрам испытаний, а также разработаны схема тепловых испытаний и методика их проведения.

На практике решение обратных задач теплообмена обычно сопровождается их преобразованием к конечномерным аналогам. Такое преобразование осуществляется за счет аппроксимации операторов уравнений, описывающих исследуемую систему и краевые условия, введения параметризации различных функций и ряда других операций. Переход к конечно-мерной формулировке обратной задачи, вообще говоря, сужает область ее возможных решений. Однако, в силу обычного отсутствия априорной информации об искомых решениях исходной задачи, эта область может быть достаточно широкой. В обратных задачах теплообмена область возможных решений определяется рядом факторов, характеризующих как условия проведения эксперимента, так и использование соответствующих дополнительных измерений состояния рассматриваемой системы. Рациональный выбор этих факторов может существенно изменить (сузить) область возможных решений обратных задач, и улучшить свойства сходимости и точности используемых вычислительных алгоритмов. Данная лекция посвящена анализу задачи оптимизации условий проведения экспериментов, в частности выбора оптимальной схемы размещения точек измерений при параметрической идентификации математических моделей теплообмена. Путем математического моделирования исследуется влияние размещения измерительных средств на точность решения обратных задач. Рассматриваются различные постановки задачи оптимального планирования эксперимента. Анализируются алгоритмы численного решения задач оптимизации схемы размещения измерительных средств. Приводятся некоторые примеры решения задач планирования измерений при проведении теплофизических экспериментов.

Работа была выполнена в рамках гранта РФФИ № 21-19-00683.

A. V. Nenarokomov¹

¹ Moscow Aviation Institute (National Research University),
Moscow, 125993, Volokolamskoe highway, 4

OPTIMAL EXPERIMENT DESIGN OF THERMAL EXPERIMENTS WITH DATA PROCESSING BY INVERSE PROBLEMS METHODS

А.Г. Здитовец

Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова
119192, г. Москва, Мичуринский проспект, д. 1*

ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЕ В ПОТОКЕ СЖИМАЕМОГО ГАЗА

В докладе приведен обзор работ, проводимых в лаборатории «Термогазодинамика» НИИ механики МГУ под научным руководством академика Александра Ивановича Леонтьева в последнее десятилетие его жизни. Основное внимание уделено принципу работы и способам повышения эффективности устройства для безмашинного энергоразделения (температурного разделения) газового потока, предложенного Леонтьевым А.И. – труба Леонтьева (ТЛ) [1-2]. В таком устройстве поток разделяется на холодный и горячий (с температурой торможения меньше и больше начальной). Процесс протекает без совершения технической работы и без теплообмена с окружающей средой. Перераспределение температуры торможения происходит только за счет газодинамических процессов, происходящих внутри потока. Поэтому в таких устройствах отсутствуют механизмы, приводимые в движение газом. Они просты, надежны, не требуют системы смазки и малоинерционны. Однако имеют более низкую эффективность по сравнению с обычными (машинными) способами получения горячих и холодных потоков, требующих сложных устройств и механизмов, таких как компрессоры, турбины, детандеры и т.п.

Самое распространенное устройство безмашинного энергоразделения – это вихревая труба Ранка-Хилша, в которой потоку на входе придается сильная начальная закрутка, а на выходе – с периферии отводится горячий поток, а из центра – холодный. В итоге разность температур между горячим и холодным потоками может достигать нескольких десятков градусов, при этом оба потока испытывают существенные потери давления. В трубе Леонтьева, внутренние каналы спрофилированы таким образом, что создается два потока – сверхзвуковой и дозвуковой. Между собой потоки разделены теплопроводной перегородкой. За счет более интенсивного процесса диссипации кинетической энергии в пограничном слое сверхзвукового потока, температура его пристенных слоев снижается по сравнению с начальной температурой, а в дозвуковом пограничном слое данная температура практически равна начальной. Из-за образовавшейся разности температур возникает тепловой поток от дозвукового потока к сверхзвуковому. В результате на выходе из

* А.Г. Здитовец, zditovets@mail.ru

устройства получим более нагретый сверхзвуковой поток и охлажденный дозвуковой, при этом давление в дозвуковом потоке практически сохраняется, что является одним из преимуществ ТЛ. На эффективность энергоразделения в ТЛ влияют многие факторы, такие как теплофизические параметры рабочего тела (число Прандтля) [3], рельеф поверхности, обтекаемой сверхзвуковым потоком, фактор аналогии Рейнольдса, наличие скачков уплотнения и отрывов пограничного слоя [4], вдув/отсос через поверхность разделяющую потоки [5-6], наличие конденсирующихся компонент .

В докладе приведены результаты, в основном экспериментальных исследований, посвященных оценке влияния вышеперечисленных факторов. Показаны перспективные направления использования данного способа. Оценены его сильные и слабые стороны.

Список литературы

1. **Леонтьев А.И.** Температурная стратификация сверхзвукового газового потока // Доклады Академии наук. 1997. № 4(354). С. 475 – 477.

2. **Leontiev A.I., 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. (88). С. 202 – 219. DOI:10.1016/j.expthermflusci.2017.05.021.

3. Вигдорович И.И., Леонтьев А.И. Энергоразделение газов с малыми и большими числами Прандтля // Известия РАН Механика жидкости и газа. 2013. № 6. С. 117–134.

4. Vinogradov Y.A., Zditovets A.G., Leontiev A.I., Popovich S.S., Strongin M.M. Experimental research of shock wave processes influence on machineless gas flow energy separation effect // Journal of Physics: Conference Series. 2017. № 1(891). DOI:10.1088 / 1742-6596 / 891 / 1 / 012080.

5. **Леонтьев А.И., Луцки В.Г., Макарова М.С.** Температурная стратификация при отсосе пограничного слоя из сверхзвукового потока // Теплофизика высоких температур. 2012. № 6(50). С. 1 – 6.

6. **Khazov D.E., Leontiev A.I., Zditovets A.G., Kiselev N.A., Vinogradov Y.A.** Energy separation in a channel with permeable wall // Energy. 2022. № xxxx(239). С. 122427. DOI:10.1016 / j.energy.2021.122427.

A.G. Zditovets,

Lomonosov Moscow State University, Institute of Mechanics, Russia,
Moscow, 119192, Michurinskiy prosp., 1

ENERGY SEPARATIONS IN THE COMPRESSIBLE GAS FLOW

*Н.Г. Иванов*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29***ЗАДАЧИ ТРЕХМЕРНОГО ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЙ И ТЕПЛОМАССОБМЕНА
В ЖИЛЫХ ОТСЕКАХ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ
СТАНЦИИ**

В докладе представляется опыт численного моделирования трехмерных течений в вентилируемых жилых отсеках Международной космической станции (МКС) на основе решения стационарных и нестационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (Steady/Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS/URANS). Рассмотрены результаты моделирования вентиляции отдельных модулей МКС (см., например, [1-3]), кораблей доставки экипажа и грузов [4], а также жилого объема станции в целом [5]. Затрагиваются вопросы влияния на качество воздушной среды неполадок в системах охлаждения МКС [5] и использования систем пожаротушения [6].

Существенное внимание уделяется методическим аспектам построения вычислительной модели, основанной на использовании программного пакета ANSYS Fluent, а также обоснованию достоверности получаемых результатов. Демонстрируются результаты валидации данных, полученных в ходе расчетов тестовых вентиляционных течений в модельных помещениях, для которых в литературе имеются экспериментальные данные по полям скорости и/или концентрации примеси (см., например, [7-8]). Обсуждаются возможности дифференциальных моделей турбулентности при воспроизведении существенно трехмерной структуры вентиляционных течений, в том числе при реализации нестационарных режимов течения с квазипериодическими низкочастотными колебаниями. Для одного из модулей МКС результаты расчетов по методу RANS сопоставлены с данными поверочного расчета по методу моделирования крупных вихрей, а также с имеющимися для макета данного модуля экспериментальными распределениями скорости [9].

Представляются результаты применения методики коррекции поля модуля средней скорости, состоящей в реконструкции поля среднего модуля скорости на основе данных о полях модуля средней скорости и интенсивности турбулентности. Методика позволяет на основе расчетов по методу RANS/URANS проводить оценки типичных скоростей в вентилируемом помещении

* Н.Г. Иванов, ivanov_ng@spbstu.ru

при существенной роли крупномасштабных пульсаций воздушных струй. Обсуждаются результаты анализа полученных в ходе расчетов трехмерных полей скорости, температуры и концентрации углекислого газа с точки зрения обеспечения комфортной и безопасной среды для работы и отдыха экипажа МКС.

Список литературы

1. **Turner E.D., Son C.S., Smirnov E.M., Ivanov N.G., Telnov D.S.** Air circulation and carbon dioxide concentration study of International Space Station Node 2 with attached modules // SAE 2004 Transactions. Journal of Aerospace. 2005. P. 1150 – 1154.
2. **Son C.H., Ivanov N.G., Telnov D.S., Smirnov E.M.** CFD modeling of water droplet transport for ISS hygiene activity application // AIAA Technical Paper AIAA 2013-3456. 2013. 8 p.
3. **Son C.H., Ivanov N.G., Smirnov E.M., Telnov D.S.** Computational Fluid Dynamics airflow modelling of the CASA – Crew Alternative Sleeping Area of the ISS / In: Proc. of the 51st International Conference on Environmental Systems, July 10-14, 2022, Saint Paul, Minnesota, USA. 2022. 10 p.
4. **Son C.H., Dunaway B.R., Smirnov E.M., Ivanov N.G., Telnov D.S.** Analysis of convective heat transfer in the orbiter middeck for the Shuttle rescue mission // SAE Int. J. Aerospace. Vol 4(1). June 2011. P. 525 – 530.
5. **Son C.H., Ivanov N.G., Telnov D.S., Smirnov E.M.** Numerical study of ammonia leak and dispersion in the International Space Station // AIAA Technical Paper AIAA 2012-3582. 2012. 10 p.
6. **Son C.H., Ivanov N.G., Telnov D.S., Smirnov E.M.** CFD modeling of water mist portable fire extinguisher discharge characteristics in the International Space Station / In: Proc. of the 44th International Conference on Environmental Systems, July 13-17, 2014, Tucson, Arizona, USA. 2014. P. 871 – 880.
7. **Ivanov, N., Smirnov, E., Lacor, C.** Computational Fluid Dynamics analysis of pollutant dispersion in a ventilated atrium / In: Proc of Roomvent 2007 Conference, June 13-15, 2007, Helsinki, Finland. 9 p.
8. **Hurnik M., Ivanov N., Zasimova M., Popiolek Z.** Local and gross parameters of air distribution in a room with a sidewall jet: CFD validation based on benchmark test // Building and Environment. 2022. Vol. 207, Part B. 108509.
9. **Smirnov E.M., Ivanov N.G., Telnov D.S., Son C.H.** CFD modeling of cabin air ventilation in the International Space Station: a comparison of RANS and LES data with test measurements for the Columbus Module // Int. J. of Ventilation. 2006. Vol. 5. № 2. P. 219 – 228.

N.G. Ivanov

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University,
Russia, 195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya, 29

3D NUMERICAL SIMULATION OF VENTILATION AIRFLOW AND HEAT AND MASS TRANSFER IN PRESSURIZED VOLUME OF THE INTERNATIONAL SPACE STATION

*П.А. Стрижак*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 30

ГАЗОГИДРАТНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ: ПРОБЛЕМЫ И ДОСТИЖЕНИЯ

Ресурсоэффективное и экологичное потребление тепловой и электрической энергии является одним из важных факторов развития общества [1]. Повышение энергетической потребности во многих странах мира за счет интенсивного потребления традиционных ископаемых видов топлива приводит к значительным проблемам, связанным с истощением ресурсов и загрязнением окружающей среды [1]. Для решения данных проблем и преодоления энергетического кризиса непрерывно ведутся исследования с целью разработки альтернативных экологичных видов топлива [2]. Однако, поиск альтернативных источников энергии – одна сторона потенциального решения проблемы. Другая сторона заключается в поиске подходящих энергоносителей для хранения, транспортировки и распределения энергии и обеспечения ее эффективного использования. Газовые гидраты считаются перспективным энергетическим ресурсом [3]. Они представляют соединения из воды и газа, образующиеся при низких температурах и высоком давлении, в которых основным газом является чаще всего CH_4 [3]. Газовые гидраты используются для хранения и транспортировки газа. Такое хранение считается оптимальным по критериям пожаровзрывоопасности и эффективным вследствие высокой объемной емкости по сравнению с природным газом. Газовые гидраты, с точки зрения топливного ресурса, обладают повышенной экологичностью. После сгорания они не оставляют твердых остатков, а образующийся в процессе горения водяной пар помогает снизить концентрации антропогенных выбросов. Из-за особенностей состава (вода и газ) механизм горения такого топлива значительно отличается от аналогичных механизмов при горении традиционных источников энергии.

Для энергоэффективного сжигания газовых гидратов в топках энергоустановок необходимо определение условий безопасного и стабильного зажигания гранул гидрата. В известных экспериментальных исследованиях процесса зажигания газовых гидратов чаще всего объектом изучения становится структура пламени при стабильном режиме горения.

В рамках цикла научных работ изучались характеристики процессов диссоциации и зажигания газовых гидратов, как одинарных, так и составных. Рассматривались характеристики зажигания (времена задержки зажигания, кон-

центрации основных компонентов, образующихся при сжигании гидратов, скорости диссоциации) при разных схемах нагрева. Согласно экспериментальным и теоретическим данным концентрации оксидов азота и углерода, образующиеся при сжигании газового гидрата, значительно ниже, чем при сжигании традиционных топлив. Установлено, что поведение при воспламенении метана, пропана и других газов существенно отличается от поведения других газов, образующихся при диссоциации газовых гидратов. Показано, что ключевые факторы (размер, количество и расстояние между гидратными гранулами, температура внешней газовой среды, компонентный состав гранул, а также их форма и пористость) влияют на скорость воспламенения в исследуемых системах.

К настоящему моменту времени энергетическое использование газовых гидратов сдерживается отсутствием технологических решений, позволяющих обеспечивать условия устойчивого зажигания гранул порошка или таблетированных образцов и максимально полного и экологичного выгорания топлива с минимизацией эффектов захлаживания стенок камеры сгорания и недожога топлива. Результаты исследований представляют интерес для развития энергоэффективных технологий сжигания альтернативных топлив. В рамках запланированной лекции будут представлены перспективные решения ключевых задач развития газогидратных энергетических технологий.

Работа выполнена при поддержке программы развития Национального исследовательского Томского политехнического университета (проект Приоритет-2030-НИП/ЭБ-006-0000-2023).

Список литературы

1. **Yao L.** New energy utilization in environmental design and realization // Energy Reports. 2022. V. 8. P. 9211–9220.
2. **Guo Z., Miao Z., Guo F., Guo Y., Feng Y., Wu J., Zhang Y.** Parameter optimization of waste coal briquetting and particulate matter emissions test during combustion: A case study // Environmental Pollution. 2022. V. 294. Article number 118621.
3. **Yang M., Dong S., Zhao J., Zheng J. nan, Liu Z., Song Y.** Ice behaviors and heat transfer characteristics during the isothermal production process of methane hydrate reservoirs by depressurization // Energy. 2021. V. 232. Article number 121030.

P.A. Strizhak

National Research Tomsk Polytechnic University
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia

**GAS HYDRATE ENERGY TECHNOLOGIES:
PROBLEMS AND ACHIEVEMENTS**

В.С. Бердников¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1*

СВОБОДНАЯ И СМЕШАННАЯ КОНВЕКЦИЯ В РАЗНОМАСШТАБНЫХ ПРИРОДНЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Исследования свободной конвекции в вертикальных слоях жидкости со стенками, нагретыми до разных температур, и в горизонтальных слоях, подогреваемых снизу, были начаты в ИТ СО РАН практически с момента создания института под руководством А.И. Леонтьева [1, 2]. Исследования пространственных форм течения и устойчивости пограничных слоев продолжались при стационарных установившихся граничных условиях с использованием все более новых и современных экспериментальных методик [3] и продолжают до настоящего времени [4-13]. В настоящее время экспериментальные исследования выполняются в плоских и кольцевых слоях с прозрачными стенками. Исследовано развитие гидродинамических пограничных слоев при стационарных и нестационарных граничных условиях с использованием цифровой видеотехники в плоскостях параллельных стенкам и по нормали к ним. При нестационарных граничных условиях экспериментально и численно изучено развитие пограничных слоев и исследована зависимость полей температуры от времени в тонких (с использованием современного тепловизора) и в массивных стенках после натекания потока нагретой жидкости [4-7]. Комплексно исследовано влияние конвективного теплообмена на формы фронтов кристаллизации и на поля температуры в кристаллах в режимах свободной и смешанной конвекции при вращении кристаллов и тиглей в основных методах направленной кристаллизации [8-13].

Список литературы

1. **Леонтьев А.И., Кирдяшкин А.Г.** Теплообмен при свободной конвекции в горизонтальных щелях и в большом объеме над горизонтальной поверхностью // ИФЖ. 1965. Т. 9. № 1. С. 9 — 14.
2. **Кирдяшкин А.Г., Леонтьев А.И.** Исследование гидродинамики и теплообмена в вертикальных слоях жидкости при свободной конвекции // ТВТ. 1969. Т. 7. № 5. С. 940 — 946.
3. **Kutateladze S.S., Berdnikov V.S.** Structure of thermogravitational convection in flat variously oriented layers of liquid and on a vertical wall // Int. J. Heat Mass Transf. 1984. Vol. 27. № 9. P. 1595 — 1611.

* В.С. Бердников, berdnikov@itp.nsc.ru (E-mail)

4. **Бердников В.С. и др.** Влияние нестационарной тепловой гравитационно-капиллярной конвекции на распределение температуры в тонкой вертикальной стенке // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17. № 2. С. 197 – 208.

5. **Бердников В.С., Митин К.А., Митина А.В.** Влияние конвективной теплоотдачи на поле температуры в низкотеплопроводной вертикальной стенке // Тепловые процессы в технике. – 2015, № 3. С. 103 – 108.

6. **Бердников В.С., Кислицын С.А.** Численные исследования нестационарного сопряженного конвективного теплообмена в вертикальных слоях жидкости и газа, разделенных тонкой металлической перегородкой // Теплофизика и аэромеханика. 2021. Т. 30. № 1. С. 107 – 119.

7. **Mikhaylov A. V., Grishkov V.A., Berdnikov V.S.** Dependence of the temperature fields of a thin vertical wall on the intensity of the oncoming flow of a heated liquid // Journal of Physics: Conference Series **1867** (2021) 012040. IOP Publishing.

8. **Бердников В.С., Кислицын С.А., Митин К.А.** Численное моделирование процессов роста кристаллов методом горизонтальной направленной кристаллизации из расплавов с различными числами Прандтля // Известия Российской академии наук. Серия Физическая. 2017. Т. 81. № 10. С. 1389 – 1394.

9. **Митин К. А., Бердников В. С.** Влияние режимов теплоотдачи на поле температуры в кристаллах в методе Чохральского // Известия РАН. Серия физическая. 2022. Т. 86. № 7. С. 987 – 994.

10. **Бердников В.С., Гришков В.А., Ковалевский К.Ю., Марков В.А.** Тепловизионные исследования ламинарно-турбулентного перехода в рэлей-бенаровской конвекции // Автометрия. 2012. Т. 48. № 3. С. 111 – 120.

11. **Бердников В.С., Винокуров В.А., Винокуров В.В., Гапонов В.А.** Влияние режимов конвективного теплообмена в системе тигель – расплав – кристалл на форму фронта кристаллизации в методе Чохральского // Тепловые процессы в технике. 2011. № 4. С. 177-186.

12. **Kislitsyn S.A., Berdnikov V.S.** Numerical simulation of crystallization on a stationary and rotating cooled disk // Journal of Physics: Conference Series **1867** (2021) 012030 IOP Publishing

13. **Кислицын С.А., Митин К.А., Бердников В.С.** Моделирование процессов теплообмена при росте монокристаллов методом Бриджмена-Стокбаргера в неподвижных и вращающихся тиглях // Вычислительные технологии. 2021. Т. 26. № 1. С. 21 – 32.

V.S.Berdnikov¹

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics of the
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Russia 630090 Novosibirsk, Lavrentyev Avenue, 1

**FREE AND MIXED CONVECTION IN DIFFERENT-SCALE
NATURAL, TECHNICAL AND TECHNOLOGICAL SYSTEMS**

*Н.И. Михеев*Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН»,
420111, г. Казань, ул. Лобачевского, д. 2 / 31***СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭТАЛОННОЙ БАЗЫ РФ
В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ТЕКУЧИХ СРЕД**

Исследования процессов переноса в динамически неравновесных турбулентных течениях, выполняемые в лаборатории Гидродинамики и теплообмена ИЭПТ КазНЦ РАН, имеют четкую инновационную направленность и многочисленные инженерные приложения в области теплоэнергетики, транспортного машиностроения и трубопроводного транспорта. В докладе представлены результаты реализации результатов исследований в прикладной области, связанной с созданием новых эталонных установок для контроля метрологических характеристик систем измерений количества энергоносителей при их добыче и транспортировке. С 2013 г. по настоящее время ФИЦ КазНЦ РАН совместно с индустриальным партнером, ООО НПП Ирвис, г. Казань, выполнен 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), расположенных во ВНИИР, г. Казань. В результате исследований [1-6] найдены и внедрены пионерские решения, которые способствовали выходу эталонной базы РФ в области расходомерии на лидирующие позиции в мире.

К эталонным установкам предъявляются предельно высокие требования к точности: расширенная неопределенность воспроизведения объемного расхода единиц массы, объема и расхода текучей среды для разных типов установок не должна превышать 0,04...0,08 % при коэффициенте охвата $K = 2$. Серийная продукция не обеспечивает таких требований. Ведется разработка специализированного оборудования и новых методов моделирования рабочих процессов в нем, обеспечивающих высокую точность. В настоящее время ФИЦ КазНЦ РАН совместно с ООО НПП Ирвис по техническим заданиям ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, г. Санкт-Петербург, участвует в разработке и создании Государственного первичного специального эталона единицы массового расхода газожидкостных смесей (ГЭТ-195),

*Н.И.Михеев, n.miheev@mail.ru

а также Государственного первичного специального эталона единицы объемного расхода природного газа при давлении до 10 МПа.

Эталонные установки являются наукоемкими и высокотехнологичными продуктами. Особенно острая ситуация в настоящее время сложилась в области компакт-пруверов и эталонов-переносчиков. В РФ пока не выпускается такое оборудование, а закупавшееся оборудование из западных стран ныне находится под санкциями. Начато создание импортозамещающих эталонных установок. Кроме того, продолжатся работы по расширению номенклатуры замещаемых импортных расходомеров газа RVG, FlowSick, Prowirl, Krohne и др. ультразвуковыми расходомерами модельного ряда ИРВИС.

Список литературы

1. **Mikheev N.I., Molochnikov V.M., Kratirov D.V., Dushina O.A., Paereliy A.A., Tukhvatullin A.R.** New approach to maintaining liquid flow rate stability in national primary standard // Flow Measurement and Instrumentation, 2021. Vol. 79. 101930.

2. **Mingaleev A.V., Gorchev A.I., Fafurin V.A., Mikheev N.I.** National Primary Standard GET 118-2013 for the units of volumetric and mass gas flow rates // Measurement Techniques, 2015, Vol. 58 (2) 115-120.

3. **Mikheev N., Saushin I., Paereliy A., Kratirov D., Levin K.** Cyclone separator for gas-liquid mixture with high flux density // Powder Technology, 2018. Vol. 339. 326-333.

4. **Mikheev N., Saushin I., Goltsman A., Fafurin V.** Data of numerical simulation and experimental research on the design of a cyclone separator with a high flux density / Data in Brief, 2018. Vol. 20. 1836-1843.

5. Патент на изобретение №2729239 от 05.08.2020. Вихревой сепаратор сжато-го газа. **Михеев Н.И., Кратиров Д.В. и др.**

6. Способ калибровки критических сопел и устройство для калибровки критических сопел / А.И. Горчев, А.В. Мингалеев, И.А. Быков, Д.В. Кратиров, Н.И. Михеев // Патент на изобретение №2654934. Оп.23.05.2018. Бюл. №15-2018.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №22-19-00507). Частично использованы результаты прикладных исследований, полученные в рамках Государственного задания и хозяйственных договоров КазНЦ РАН.

N.I. Mikheev

Federal Research Center «Kazan Scientific Center of RAS»
2 / 31 Lobachevskogo Str., Kazan 420111 Russia

**IMPROVING THE BASE OF PRIMARY STANDARDS
IN FLUID FLOW METERING AVAILABLE IN RUSSIA**

*И.В. Егоров^{1,2}*¹ Московский физико-технический институт,
141701, Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9² Центральный аэрогидродинамический институт,
140180, Жуковский, ул. Жуковского, д. 1

ЦЕЛОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА

При низком уровне внешних возмущений ламинарно-турбулентный переход (ЛТП) в пограничном слое на аэродинамически гладкой поверхности развивается по так называемому модальному сценарию: внешние возмущения возбуждают моды пограничного слоя с малыми начальными амплитудами (стадия восприимчивости); неустойчивые моды экспоненциально растут вниз по потоку в соответствии с линейной теорией устойчивости (линейная стадия развития неустойчивости); когда амплитуда возмущения достигает пороговый уровень, начинается его нелинейный распад, который связывают с началом ламинарно-турбулентного перехода (x_l). В окрестности сечения x_l , как правило, рождаются турбулентные пятна. Развиваясь вниз по потоку, пятна растут и сливаются между собой. Этот процесс заканчивается в сечении $x=x_T$, начиная с которого течение всюду является турбулентным. В инженерной практике участок $x_l < x < x_T$ называют областью ЛТП.

Большинство теоретико-расчетных методов сосредоточено на предсказании начала ЛТП. Среди них наиболее распространен эмпирический e^N -метод [1], который коррелирует интегральный рост неустойчивых возмущений (N-фактор) с точкой начала перехода. Чтобы уменьшить эмпиризм e^N -метода, Мэк [2] предложил амплитудный метод, который устраняет эти недостатки. Начало ЛТП предсказывается с помощью амплитудного критерия. Дальнейшее развитие амплитудного метода представлено, например, в работе [3].

Акустические волны, излучаемые турбулентным пограничным слоем на стенках сопла аэродинамической трубы, являются основным источником внешних возмущений, инициирующих ЛТП на испытуемых моделях [4]. Аналогичная ситуация возникает на крыле сверхзвукового самолета, которое облучается акустическими волнами от турбулентного пограничного слоя на передней части фюзеляжа. Поэтому актуальна задача о моделировании ЛТП в сверхзвуковом пограничном слое под действием акустических возмущений набегающего потока. В настоящей работе рассматривается возбуждение и

развитие неустойчивых волн первой моды на пластине при числе Маха набегающего потока. Основные цели работы: выполнить целостное численное моделирование всех стадий перехода вплоть до рождения турбулентности, оценить возможность практической реализации амплитудного метода для предсказания начала перехода.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 21-19-00307.

Список литературы

1. **Smith, A.M. O., Gamberoni, A.H.** “Transition, Pressure Gradient and Stability Theory,” Douglas Aircraft Co., Rept. ES26388, El Segundo, CA, Aug. 1956.
2. **Mack, L.M.** “Transition and Laminar Instability”, NASA-CP-153203, Jet Propulsion Lab., Pasadena, Calif., May 15, 1977.
3. **Fedorov, A.** “Applications of the Mack Amplitude Method to Transition Predictions in High-Speed Flows”, NATO Science and Technology Organization RTO-MP-AVT-200, 2012, Paper No. 6, pp. 6-1 – 6-30.
4. **Pate S.R.** (1980) Effects of wind tunnel disturbances on boundary-layer transition with emphasis on radiated noise: A review // AIAA Paper No. 80-0431
5. **Mack L.M.** Boundary-layer stability theory. Part B. Doc. 900-277, JPL, Pasadena, California, May 1969.

I. V. Egorov^{1,2}

¹ Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT), 9 Institutsky per., Dolgoprudny, Moscow reg., 141701, Russia

² Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI), 1 Zhukovskogo Str., Zhukovsky, Moscow reg., 140180, Russia

HOLISTIC SIMULATION OF THE LAMINAR-TURBULENT TRANSITION

А.А. Авдеев, Д.А. Виноградов

Объединенный институт высоких температур РАН,
111116, Москва, ул. Красноказарменная, д. 17А *

РОСТ, КОНДЕНСАЦИЯ, РАСТВОРЕНИЕ ПАРОВЫХ И ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЕЙ В ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКАХ

Все без исключения накопленные к настоящему времени экспериментальные данные по скоростям роста, конденсации, растворения паровых (газовых) пузырей, сносимых турбулентным потоком перегретой, или недогретой до состояния насыщения жидкости, показывают, что классические формулы, описывающие динамику пузырей в большом объеме неподвижной жидкости, в рассматриваемых условиях не применимы. В качестве примера на рис. 1 показано сравнение результатов расчета изменения радиуса пузыря во времени по в рамках динамической инерциальной схемы Релея (кривая 1) и тепловой схеме (кривая 3) с экспериментальными данными Б.А. Кольчугина и др. (точки и кривая 2).

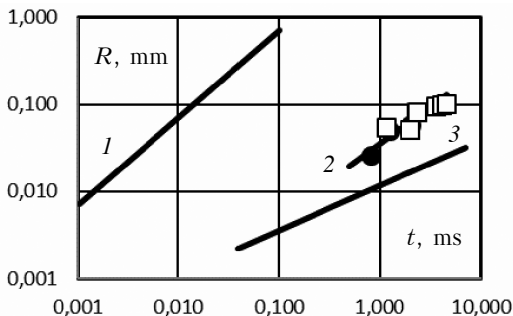


Рис. 1. Рост парового пузыря в потоке перегретой жидкости

Предложенные ранее полуэмпирические формулы построены на основе отдельных групп точек и не претендуют на описание всего массива имеющихся экспериментальных данных.

Последовательное применение модели периодического обновления поверхности позволило получить формулы для расчета тепло- и массообмена на поверхности пузырей, дрейфующих в турбулентных потоках в каналах [1]:

*А.А. Авдеев, alex3@safe-mail.net

для области повышенных чисел Рейнольдса, $Re > 10^4$ и

$$Nu = 2.3Re^{0.45} Pr^{0.5} B,$$

для области умеренных чисел Рейнольдса $Re < 10^4$

Здесь A, B – параметры, учитывающие влияние паросодержания.

Эти соотношения описывают все имеющиеся экспериментальные данные по скоростям роста и конденсации паровых пузырей ($2300 < Re < 2 \cdot 10^6$), а при соответствующем выборе диффузионного числа Прандтля ($Pr_D = 568$) и данные по растворению пузырей двуокиси углерода в воде, рис. 2.

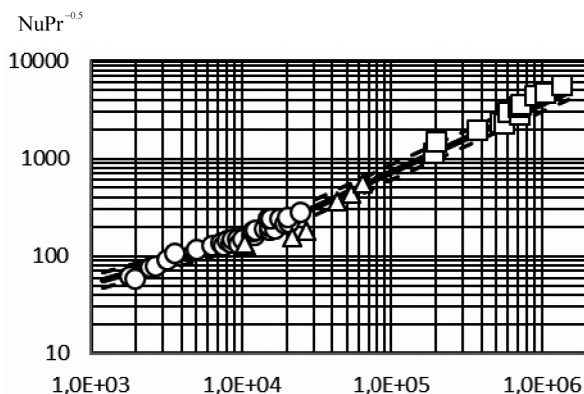


Рис. 2. Сравнение результатов расчета с экспериментом

Разработанная модель обладает большой гибкостью и при необходимости может быть адаптирована для широкого класса турбулентных течений.

Список литературы

1. Avdeev A.A. Bubble systems. Springer Switzerland, 2016. 466 p.

A.A. Avdeev, D.A. Vinogradov

Joint Institute of High Temperature,
Russia, 111116, Moscow, Krasnokazarmennaya, 17A

**BUBBLE GROWTH, CONDENSATION,
DISSOLUTION IN TURBULENT FLOWS**

И.В. Деревич

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
(исследовательский университет),
105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5

МЕТОДЫ СОВРЕМЕННОЙ ТЕОРИИ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕХНИЧЕСКИХ И БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Случайность – основа существования природных, биологических и технических систем. Детерминированное поведение даже технических устройств является скорее исключением, теоретической абстракцией, чем реальным правилом. Ярким примером случайных процессов и полей является турбулентность, природные явления не укладываются в детерминированные модели, в биологических системах случайность (стохастичность) является естественной формой существования живых организмов.

Несмотря на различия в работе технических и способах существования биологических систем с точки зрения математического описания параметров этих объектов между ними много общего. Это еще раз подчеркивает мощь и универсальность современного математического аппарата случайных процессов. Поэтому основная цель моей лекции – привлечь внимание молодых ученых к изучению математических идей и техники вычислений в прикладной теории случайных процессов. Следует также отметить, что попытки выдумать «собственную математику» без целенаправленного изучения основ современной теории случайных приводят, как правило, к очень громоздким и некорректным вычислениям.

В первой части лекции будут кратко описаны основные математические понятия теории случайных процессов. Изложение основано на современном подходе, использующем аппарат обобщенных функций. Обсуждаются методы осреднения по ансамблю случайных реализаций, идея которого принадлежит А.Н. Колмогорову. Обсуждается эквивалентность абстрактного метода осреднения по ансамблю и физического осреднения, которое реализуется в технических приложениях (эргодическая теорема). Вводится понятие индикаторной функции и функции плотности вероятности (А.Н. Колмогоров). Приводятся примеры различных типов случайных процессов и методы их численной реализации. Иллюстрируются явления выбросов случайных процессов и выходов случайных процессов за установленный уровень. Обсуждается возможность использования теории выбросов случайных процессов для моделирования взрывных эффектов, передачи генетической информации, распространении

инфекционных заболеваний, образовании кластерных систем как в технических приложениях, так и при социальном поведении больших масс индивидов. Иллюстрируется важное понятие корреляционных функций, выражающих эффекты «памяти» системы о ранее принятых решениях.

Рассматриваются два принципиально различных подхода для изучения динамики динамических стохастических систем. Первый подход, дающий детальную информацию о поведении динамических систем в случайных полях – подход Лагранжа. Рассматриваются современные методы моделирования, основанные на численном решении стохастических обыкновенных дифференциальных уравнениях (СОДУ), основанных на модернизированных алгоритмах типа Рунге – Кутты. Обсуждается сильная и слабая сходимости алгоритмов решения СОДУ. Рассмотрен ряд примеров, представляющих научный и практический интерес. Описаны идеи математических алгоритмов вычисления эмпирических функций плотности вероятности (ФПВ), корреляционных функций, моментов первого пересечения случайным процессом заданного уровня. Несмотря на детальную динамику стохастических систем в подходе Лагранжа трудно выявить принципиальные тенденции в поведении случайных систем и основные критерии.

Второй подход основан на использовании ФПВ случайных систем, полученных в результате численного решения замкнутых уравнений. Это метод Эйлера. Обсуждается универсальностью описания динамических систем с помощью ФПВ. Дан обзор современных методов замыкания уравнений для ФПВ. Представлены примеры замкнутых уравнений для ФПВ. Описаны разработанные численные консервативные схемы для решения замкнутых уравнений для ФПВ. Представлены примеры сопоставления эмпирических ФПВ, полученных на основе обработки данных прямого численного моделирования, и ФПВ, найденных путем численного решения замкнутых уравнений. Обсуждаются примеры численных расчетов среднего времени первого пересечения случайным процессом заданного уровня. Представлены примеры технических реализаций, биологических и социальных систем.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00243, <https://rscf.ru/project/23-29-00243/>

I. V. Derevich

Bauman Moscow State Technical University,
Russia 105005 Moscow, 2-nd Baumanskaya, 5

**METHODS OF THE MODERN THEORY OF RANDOM
PROCESSES IN THE MODELING OF TECHNICAL
AND BIOLOGICAL SYSTEMS**

Т.В. Карпухина¹, В.Н. Ковальногов¹, А.А. Ометова¹, М.В. Карпухина¹

¹ Ульяновский государственный технический университет,
432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ДИФфуЗИИ ЖИДКОСТИ В КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОМ ПРОСТРАНСТВЕ КИРПИЧА ИЗ ПРЕССОВАННОГО ШЛАМА

В настоящее время во всех электроцентралях производится внедрение новых технологий для повышения экономической эффективности производства.

Шлам представляет собой отходы продукта, которые состоящие из мелкодисперсных частиц, получаемые в виде осадка. Внутри жидкости они находятся во взвешенном состоянии.

Шламы образуются при переработке сырьевых материалов в товарные продукты, например, в нефтеперерабатывающих, металлургических и других процессах, а также при бурении скважин, при водоподготовке и водоочистке. Как правило, шламы высокотоксичны и загрязнены органическими и минеральными примесями. При их захоронении в шламонакопитель кроме ущерба, наносимого окружающей среде, одновременно теряется большое количество ценного сырья. Повторное использование извлеченных из шламов материалов, наоборот позволяет в ощутимых количествах экономить природные ресурсы и снизить нагрузку на окружающую среду.

Благодаря фильтр-прессу шламовый осадок превращается в строительный материал. Шламовый осадок с помощью насоса поступает на фильтр-пресс, где твердые частицы отделяются от жидкости и прессуются в плотные брикеты, которые впоследствии можно использовать для производства строительных изделий.

Твердый кек, сформировавшийся в фильтрационной камере промывается водой, которая подается по разным направлениям: в направлении подачи продукта, противопоточно и перекрестно. Подобная система позволяет осуществлять равномерную промывку и минимизировать процентное содержание солей в твердой фазе, представляя собой эффективную альтернативу традиционной репульсации за счет сокращения времени цикла и расхода воды.

Для того чтобы было понимание, каким образом и где использовать шламы производств, необходимо изучить их свойства.

Коэффициент диффузии D , являющийся одной из наиболее важных величин, определяющих скорость диффузии, зависит от природы раствори-

теля и растворенного вещества, от структурных факторов (размер зерна, плотность и характеристики распределения дефектов строения кристаллической решетки) и очень сильно от температуры, то есть анализ D представляет собой достаточно сложную физическую задачу

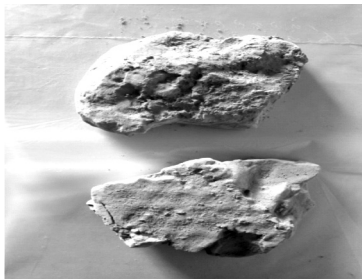


Рис. 1. Образцы кирпичей из прессованного шлама

По предлагаемому способу [1] определен коэффициент диффузии жидкости для кирпича из прессованного шлама.

При обработке полученных результатов были определены значения коэффициента диффузии $D = 4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$. Относительная погрешность определения коэффициента диффузии, приведенная к доверительной вероятности 0,95, составляет $\pm 5 \%$.

Работа выполнена при финансировании гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации по проекту НШ-28.2022.4.

Список литературы

1. Патент РФ 2469292. Способ определения коэффициента диффузии жидкости в капиллярно-пористом теле / В.Н. Ковальногов, Н.Н. Ковальногов, Т.В. Павловичева. №2011114023/28. Заявл.08.04.2011. Опубл. 10.12.2012. Бюл. № 34.

2. **Kovalnogov V.N., Karpukhina T.V., Boyarkin M.S.** Model of heat transfer of moisture and gases in capillary-porous space in annexes for developing biofuel cells // AIP Conference Proceedings 2293, 420023 (2020).

T.V. Karpukhina¹, V.N. Kovalnogov¹, A.A. Ometova¹, M.V. Karpukhina¹

¹ Ulyanovsk State Technical University,
Russia 432027 Ulyanovsk, Severny Venetz Street, 32

INVESTIGATION OF THE DIFFUSION COEFFICIENT OF LIQUID IN THE CAPILLARY-POROUS SPACE OF BRICKS MADE OF PRESSED SLUDGE

*Р.Р. Салахов, Р.М. Хисматуллин, А.М. Ермаков,
И.Р. Хафизов, М.К. Мелихов*

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ,
420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10*

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ КЛИМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОБУСОВ

Эксплуатация электробусов в условиях низких температур требует значительных затрат энергии на обогрев салона электробуса и поддержания температур батарей и электрооборудования. В отличие от европейских стран с более мягким климатом, где средняя температура не опускается ниже $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, в российских климатических условиях парокомпрессионная установка должна работать в диапазоне температур от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Наиболее перспективным методом обогрева является перевод парокомпрессионной холодильной машины из режима кондиционирования в режим теплового насоса. В данной работе поставлена задача исследования эффективности термодинамических циклов парокомпрессионной холодильной машины на различных рабочих телах в условиях отрицательных температур с помощью методов численного моделирования.

Для проведения исследований климатической установки создана одномерная математическая модель, которая была валидирована по результатам экспериментальных исследований, проведенных в работе [1] на фреоне R407c, в диапазоне температур испарителя от $+1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-11,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ и постоянной температурой конденсации $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$, погрешность моделирования при этом составила не более 1,87 %.

Исследования термодинамической эффективности для низких температур проведены при постоянной температуре конденсации $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, что позволяет поддерживать необходимую температуру в салоне электробуса $+14\text{ }^{\circ}\text{C}$. Минимальная температура в испарителе принята $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$, что позволяет работать климатической установке при температуре окружающего воздуха $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Рабочими телами климатической установки выбраны наиболее распространенные фреоны: в климатических автомобильных установках применяется R134a (Volvo, Yutong, Proterra, Eberspacher) в климатических установках электробусов в европейских странах применяется R407c (Thermoking, Sileo,

* А.М. Ермаков, amermakov@kai.ru

VDL buses) и R410a, который пока не нашел широкого распространения и применяется компанией Cooltek.

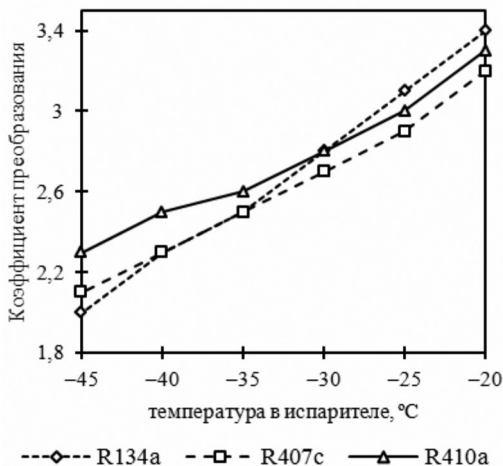


Рис. 1. Коэффициент преобразования климатической установки в зависимости от температуры в испарителе

Результаты моделирования показывают, что наиболее перспективным из рассматриваемых фреонов для обогрева салона электробуса является фреон R410a, который имеет наиболее высокий коэффициент преобразования 2,3 при -45°C , при этом при -20°C составляет 3,3 и превосходит коэффициент преобразования R407c во всем диапазоне рассматриваемых температур.

«Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00373, <https://rscf.ru/project/22-19-00373/>»

Список литературы

1. Paul Byrne, Jacques Miriel, Yves Lenat. Experimental study of an air-source heat pump for simultaneous heating and cooling – Part 1: Basic concepts and performance verification // Applied Energy, Volume 88, Issue 5, 2011. P. 1841 – 1847.

*R.R. Salakhov, R.M. Khismatullin, A.M. Ermakov, I.R. Hafizov,
M.K. Melikhov*

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI,
Russia 420111 Kazan, K. Marx, 10

NUMERICAL SIMULATION OF THERMODYNAMIC CYCLES OF ELECTRIC BUS CLIMATE SYSTEMS

СЕКЦИЯ 1

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕПЛО-И МАССООБМЕНА ПРИ ОДНОФАЗНОЙ КОНВЕКЦИИ

*Ю.К. Руденко¹, А.В. Пуштаев¹*¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1/2

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТЕПЛА И ГЕНЕРАЦИЯ ВОЛН ПРИ ЛАЗЕРНОМ ИК-ЗОНДИРОВАНИИ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОСТИ

Для расчета и моделирования задач теплообмена, включающих границу раздела «жидкость-газ», важно правильно задавать граничные условия на поверхности жидкости, так как они влияют на скорость течения, температурные поля и рельеф поверхности. Условие свободной поверхности оказывается выполненным не всегда. В ряде жидкостей (этанол, силиконовое масло), классические условия отсутствия напряжений на поверхности выполнены, в то время как для воды (за исключением деионизированной) или глицерина они не применимы из-за наличия так называемой «слабой» примесной пленки [1]. Отличительной особенностью «слабых» пленок является тот факт, что они не препятствуют испарению и касательным напряжениям, но блокируют массообмен «поверхность-объем». В то же время, если влияние загрязнений можно исключить, то на чистой поверхности должна происходить термокапиллярная конвекция. В работе [2] было показано, что поверхность технической или дистиллированной воды существенно отличается по своим свойствам от свободной поверхности и только деионизованная вода удовлетворяет классическим условиям проскальзывания. Очевидно, что вода такой степени очистки не интересна для большинства приложений.

В настоящей работе влияние «слабой» пленки на течение было исследовано при помощи ИК-зондирования участка поверхности CO_2 -лазером с длиной волны 10,6 мкм, излучение которого поглощается в тонком приповерхностном слое глубиной порядка нескольких десятков микрон. ИК-зондирование может применяться для создания «тепловых маркеров» для диагностики движения жидкости у поверхности или состояния поверхности. Локальный нагрев может использоваться также в качестве «бесконтактного пинцета» для перемещения частиц по поверхности [3], а также для очистки поверхности. Для определения возможностей таких методов в условиях различных концентраций примесей необходим анализ образующегося течения в жидкостях с различным характерным состоянием поверхности.

Для исследования были выбраны следующие жидкости: дистиллированная вода и глицерин, в которых присутствует «слабая» пленка, этанол и силиконовое масло, в которых она отсутствует. С помощью ИК-термогра-

фии были получены поля температуры на поверхности. Методом Moon-Glade BOS [4] были проведены измерения волн, образующихся на свободной поверхности в результате локального нагрева лазерным излучением. Сравнение экспериментальных данных с численным моделированием показало хорошее согласие при использовании различных граничных условий для скорости на поверхности. Для жидкостей с поверхностной пленкой было использовано условие прилипания, для жидкостей без поверхностной пленки — условие для касательного напряжения на поверхности, описывающее термокапиллярную конвекцию.

Было показано, что, если поверхность чистая, термокапиллярное течение приводит к быстрому разлету теплового пятна. При наличии «слабой» пленки скорость расплывания на порядок меньше, максимальная температура на поверхности существенно больше. Деформация свободной поверхности, измеренная методом Moon-Glade BOS, также сильно зависит от наличия поверхностной пленки.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00135. Было использовано оборудование, приобретенное за счет средств Программы развития Московского университета. Работа Ю.К. Руденко также была поддержана Фондом развития теоретической физики и математики «Базис» (грант № 22-2-2-5-1).

Список литературы

1. **Vinnichenko N.A., Pushtaeв A.V., Plaksina Yu.Yu., Rudenko Yu.K., Uvarov A.V.** Horizontal convection driven by nonuniform radiative heating in liquids with different surface behavior // Int. J. Heat Mass Transfer. 2018. V. 126. Pp. 400-410.
2. **Vinnichenko N.A., Plaksina Yu.Yu., Baranova K.M., Pushtaeв A.V., Uvarov A.V.** Mobility of free surface in different liquids and its influence on water striders locomotion // Environ. Fluid Mech. 2018. V. 18. № 5. Pp. 1045-1056.
3. **Mallea R.T., Bolopion A., Beugnot J.-C., Lambert P., Gauthier M.** Laser-induced thermocapillary convective flows: a new approach for noncontact actuation at microscale at the fluid/gas interface // IEEE /ASME Trans. Mechatron. 2017. V. 22. № 2. Pp. 693-704.
4. **Vinnichenko N.A., Pushtaeв A.V., Plaksina Yu.Yu., Uvarov A.V.** Combined study of heat exchange near the liquid-gas interface by means of Background Oriented Schlieren and Infrared Thermal Imaging // Exp. Thermal Fluid Sci. 2020. V. 114. 110051.

Yu.K. Rudenko¹, A.V. Pushtaeв¹

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics,
Russia, 119991 Moscow, Leninskiye Gory, 1/2

HEAT PROPAGATION AND WAVE GENERATION INDUCED BY LASER IR-HEATING OF A FREE LIQUID SURFACE

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ УПЛОТНЕНИЯ ИЗМЕЛЬЧЕННОЙ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ НА ЕЁ ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ СУШКИ

К настоящему времени известны три перспективных варианта использования древесной биомассы: первый – прямое сжигание в топках водогрейных и паровых котлов [1]; второй – совместное сжигание биомассы с углём (например, [2]); третий – газификация древесной биомассы и получение в результате синтез-газа [3]. Каждая из вышеупомянутых технологий имеет свои преимущества и недостатки. В каждой из этих трех технологий [1-3] одним из обязательных элементов является процесс предварительной термической подготовки (сушки [4]) биомассы. Достаточно очевидно, что эффективность использования биомассы в энергетике можно повысить в результате совершенствования технологий её термической подготовки к сжиганию (за счет снижения энергозатрат на сушку). Последнее можно осуществить только посредством обобщения апостериорной информации о закономерностях процессов тепло- и массопереноса, протекающих при сушке древесной биомассы в условиях варьирования технологических параметров в соответствующем практике диапазоне их изменения.

В статье приведены результаты экспериментальных исследований процесса сушки слоя относительно большой толщины (до 100 мм) древесной биомассы в условиях радиационно-конвективного нагрева. Установлены значения температур в характерных точках слоя биомассы в период сушки. Проанализировано влияния плотности насыпки мелкодиспергированной древесины (сосновая стружка, опилки) на характеристики и условия её дегидратации. По результатам экспериментальных исследований (рисунок 1) установлено, что уплотнение биомассы приводит к значительному росту средней (по объему) температуры слоя. Сформулирована физическая модель, описывающая комплекс процессов тепло- и массопереноса, протекающих при нагреве древесной биомассы в условиях уплотнения. Показано, что рост плотности слоя мелкодиспергированной древесины (начальной толщиной 100 мм) в 1,7 раз приводит к увеличению температуры слоя в течение всего периода сушки в среднем на 23 %. Проведен анализ изменения теплопроводности биомассы при её уплотнении с использованием нескольких широко применя-

* Н.А. Нига́й, nai5@tpu.ru

емых математических моделей теплопроводности гетерогенных сред. Обоснованно повышение эффективности сушки биомассы при её уплотнении в результате роста эффективного коэффициента теплопроводности слоя измельченной древесной биомассы.

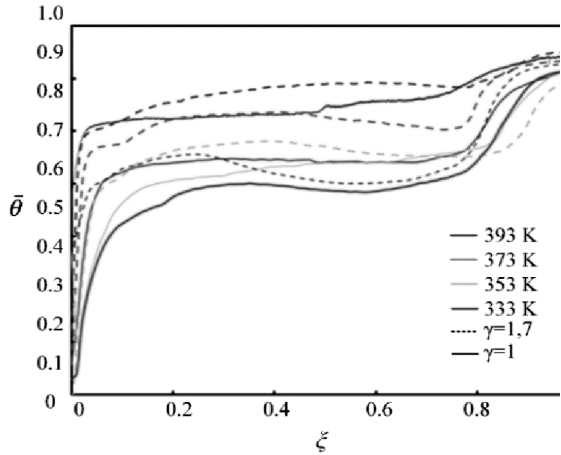


Рис. 1. Зависимости среднеобъёмных безразмерных температур ($\bar{\theta}$) от безразмерного времени сушки (ξ) при температуре в сушильной камере от 333 до 393 К для навесок биомассы с естественной засыпкой ($\gamma = 1$) и уплотненная в 1,7 раз ($\gamma = 1,7$)

Список литературы

1. H. Sefidari, N. Razmjoo, M. Strand. An experimental study of combustion and emissions of two types of woody biomass in a 12-MW reciprocating-grate boiler, Fuel 135 (2014) 120 – 129.
2. M. Tamura, Sh. Watanabe, N. Kotake, M. Hasegawa. Grinding and combustion characteristics of woody biomass for co-firing with coal in pulverised coal boilers, Fuel 134 (2014) 544 – 553.
3. K. Rabea, S. Michailos, M. Akram, K.J. Hughes, D. Ingham, M. Pourkashanian. An improved kinetic modelling of woody biomass gasification in a downdraft reactor based on the pyrolysis gas evolution, Energy Conversion and Management 258 (2022)115495.
4. H.S. EL-Mesery, S.E.El-khawaga, Drying process on biomass: Evaluation of the drying performance and energy analysis of different dryers, Case Studies in Thermal Engineering 33 (2022) 101953. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101953>.

N.A. Nigay, S.V. Syrodoy

National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue,
Tomsk 634050, Russia

THE INFLUENCE OF THE DEGREE OF COMPACTION OF CRUSHED WOOD BIOMASS ON ITS TEMPERATURE DRYING MODE

Н.Д. Пашкова^{1,2}, И.В. Никифоров^{1,2}, Я.А. Гатаулин³

¹ Федеральный исследовательский центр Казанский научный центр РАН, 420111, г. Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31, а/я 261*

² Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10

³ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЯ В ОБЛАСТИ РАЗВЕТВЛЕНИЯ КАНАЛОВ

Помимо различных технических устройств, течение в разветвляющихся каналах – неотъемлемая часть сердечно-сосудистой системы человека. В зоне соединения шунта с артерией (анастомоз) часто происходит рост внутренней поверхности стенок сосуда, что приводит к необходимости повторного оперативного вмешательства. Этот рост многие исследователи связывают с низкими напряжениями трения на стенках сосуда или их большими градиентами во времени и пространстве. В настоящей работе представлены результаты эксперимента и численного моделирования структуры течения в области дистального анастомоза – зоне присоединения шунта после пораженного участка артерии (рис. 1). Параметры рабочей жидкости и режимы течения выбирались из условия подобия гемодинамике бедренной артерии человека. Рабочий участок представлял собой область разветвления каналов с боковой подачей основного потока и был изготовлен из гладких прозрачных труб с внутренним диаметром $d = 17,4$ мм. Эксперимент включал визуализацию и SIV-измерения полей скорости на стационарном ($Re = 237$ и 1640) и пульсирующем (изменение расхода по закону течения в бедренной артерии человека [1]) режимах течения. Прямое численное моделирование выполнялось в среде Ansys Fluent.

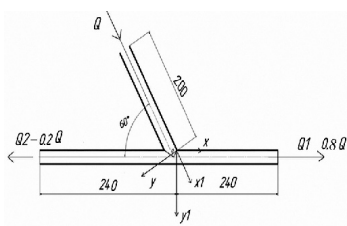
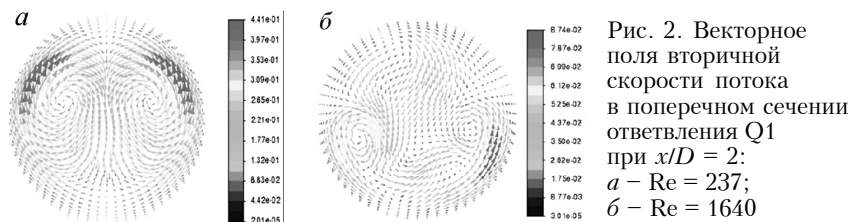


Рис. 1. Схема участка

Установлено, что на стационарном режиме в обоих ответвлениях формируются области отрыва потока. При $Re = 237$ течение в этих областях стационарное, уровень пульсаций близок к соответствующему уровню в подводящем канале. При $Re = 1640$ на внешней границе отрывных областей формируются разномаштабные вихревые структуры, пульсации скорости возрастает, наблюдаются признаки локальной турбулизации потока. Максимальные

* Н.Д. Пашкова, pashkova-2000@mail.ru

значения пульсаций скорости (в три раза выше входных пульсаций) наблюдаются в слое смещения при $x/D < 4$ канала Q1 и $-1 < x/D < -3,5$ в канале Q2 (рис. 2).



При обоих Re в поперечном сечении каналов обнаружены вторичные течения типа вихрей Дина, локализованные в отрывных областях. При $Re = 237$ эти течения имеют вид двух стационарных симметричных вихрей, а при $Re = 1640$ эта симметрия нарушается и вторичные течения обладают выраженной нестационарностью. В пульсирующем потоке увеличение уровня пульсаций наблюдается в отдельных фазах колебаний расхода, соответствующих торможению потока при положительных и отрицательных значениях расхода. Этот эффект связан, по-видимому, с вихревыми структурами, которые формируются на границе отрывной области в фазе ускорения потока и сносятся вниз по течению в фазе его торможения.

Еще одним источником повышенных пульсаций являются низкочастотные колебания границ отрывной области. Признаки турбулизации в пульсирующем потоке на этих режимах не обнаружены.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ №20-61-47068.

Список литературы

1. Klein W. M. et al. Magnetic resonance imaging measurement of blood volume flow in peripheral arteries in healthy subjects //Journal of vascular surgery. 2003. Vol. 38. №. 5. P. 1060-1066.

N.D. Pashkova^{1,2}, I.V. Nikiforov^{1,2}, Y.A. Gataulin³

¹ Federal State Budgetary Institution of Science «Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences»,

420111 Russian Federation, Tatarstan, Kazan, ul. Lobachevskogo, 2/31

² Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI,

420111 Russian Federation, Tatarstan, Kazan, K. Marksa st., 10

³ Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University,

195251 Russian Federation, St. Petersburg, Politechnicheskaya str., 29

FLOW STRUCTURE IN THE AREA OF CHANNEL BRANCHING

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР И ТЕПЛОБМЕНА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА ВЯЗКОГО ГАЗА С ОДИНОЧНЫМИ ПРЕПЯТСТВИЯМИ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ, УСТАНОВЛЕННЫМИ НА ПОВЕРХНОСТИ

Особенности, возникающие при высокоскоростных течениях газа вблизи закрепленных на обтекаемой поверхности препятствий, важно учитывать при конструировании различных элементов аэрокосмической и энергомашиностроительной техники. При этом значительный вклад вносят эффекты, связанные с вязко-невязким взаимодействием. В настоящей работе приведены результаты численного моделирования сверхзвукового обтекания одиночного препятствия, установленного на пластине, вдоль которой развивается пограничный слой (рис 1а). В большинстве работ по данной тематике изучается обтекание тел простой геометрии [1, 2], однако для практических целей интересны объекты более сложной конфигурации. Настоящая работа, которая является продолжением исследований [3], посвящена изучению влияния геометрической формы препятствия (угол скоса, форма передней кромки) на структуру потока и характеристики локального теплообмена; при этом рассматриваются случаи натекания потока при различных углах атаки относительно плоскости симметрии.

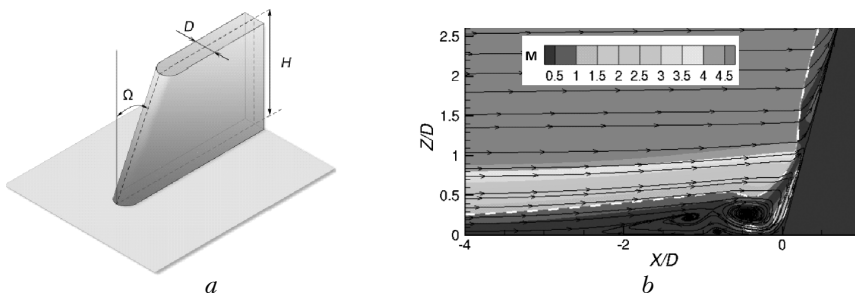


Рис. 1. Геометрическая конфигурация (а) и поле числа Маха в плоскости симметрии при обтекании тела, установленного под углом скоса $\Omega = 15^\circ$ (б)

*Е.В. Бабич, III.helen.III@mail.ru

Моделирование (на сетках, содержащих около 10 миллионов ячеек) проведено с использованием конечно-объемного «неструктурированного» программного кода SINF/Flag-S, разрабатываемого в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого. Для проведения расчетов использовались вычислительные ресурсы суперкомпьютерного центра СПбПУ (www.scc.spbstu.ru). Постановка задачи основана на данных работы [3]: рассматривается натекание сверхзвукового потока газа (воздуха) при числе Маха 5 на удлиненное цилиндрическое тело, установленное на расстоянии $30D$ (D – толщина ребра) от начала пластины при числе Рейнольдса $Re_D = 4000$. Расчеты в настоящей работе проведены при варьировании угла скоса (наклона) передней кромки тела Ω (рис. 1а), а также в случае «нормального» сочленении тела и пластины, но для различной формы эллиптической передней кромки.

По результатам параметрических расчетов проанализировано влияние геометрии препятствия на газодинамическую и вихревую структура потока, оценены динамические и тепловые нагрузки. Показано, что в случае обтекания затупленных форм передней кромки перед телом наблюдается более обширная отрывная область со сложной конфигурацией подковообразных вихревых структур, чем в случае заостренных тел. При увеличении угла скоса (рис. 1б) наблюдается сокращение отрывной зоны и уменьшение размеров вихревых структур.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-3435.2022.1.1.

Список литературы

1. **O.R. Tutty, G.T. Roberts and P.H. Schuricht.** High-speed laminar flow past a fin-body junction // J. Fluid Mech. 2013. Vol. 737. P. 19 – 55.
2. **Volf Borovoy et al.** The shock-waves interference in the flow around a cylinder mounted on a blunted plate // Proceedings of 7th EUCASS. 2017.
3. **Колесник Е.В., Смирнов Е.М.** Численное исследование вихревых структур и теплообмена при сверхзвуковом обтекании области сопряжения затупленного тела и пластины // Журнал технической физики. 2020. Т. 90. № 2. С. 185 – 192.

E.V. Babich, E.V. Kolesnik

Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University ,
Russia, 195251, Saint-Petersburg, Polytechnichnichrskaya, 29

STUDY OF VORTEX STRUCTURES AND HEAT TRANSFER IN THE INTERACTION OF A SUPERSONIC VISCOUS GAS FLOW WITH SINGLE OBSTACLES OF VARIOUS SHAPES MOUNTED ON THE SURFACE

ТЕПЛООБМЕН ПРИ ОБТЕКАНИИ ПАРЫ НАГРЕТЫХ ЦИЛИНДРОВ

Течение и теплообмен в системе круговых цилиндров является предметом многочисленных исследований по причине их широкого использования в теплообменниках: системах рекуперации тепла, экономайзерах и т.д. Обычно в экспериментальных работах определяют средний по поверхности коэффициент теплоотдачи и обобщают данные в виде зависимости числа Нуссельта от чисел Рейнольдса и Прандтля. В эти зависимости вводят поправки, учитывающие геометрию системы, степень турбулентности и т.д. Использование градиентной теплотометрии открывает новые возможности: с помощью градиентных датчиков теплового потока (ГДТП) удается получить распределение местных коэффициентов теплоотдачи [1].

В работе исследовано обтекания пары круговых цилиндров при числах Рейнольдса (Re) от $2,4 \cdot 10^3$ до $2 \cdot 10^4$, рассчитанных по диаметру. В опытах реализованы рядное и шахматное расположение цилиндров, а также варьировался шаг продольный шаг S между ними.

Экспериментальная модель состоит из двух полых цилиндров, выполненных из стального листа толщиной 0,1 мм диаметром 66 мм и длиной 600 мм, установленных на раму, позволяющую изменять положение первого по потоку цилиндра. Расстояние между цилиндрами S менялось в пределах от 0,5 до 4 калибров d . Модель обогревалась насыщенным водяным паром при атмосферном давлении, поддерживая температур поверхности теплообмена постоянной. Нижний по потоку цилиндр (второй) может вращаться вокруг оси на угол $\varphi = 0 \dots 180^\circ$. Модель помещалась в рабочую зону аэродинамической трубы НОЦ «Теплофизика в энергетике» СПбПУ.

На поверхности второго цилиндра устанавливался ГДТП из монокристаллического висмута размерами $2,5 \times 2,5 \times 0,2$ мм и чувствительностью $S = 7,6$ мВ/Вт. При прохождении через ГДТП теплового потока, в нем возникает термо-ЭДС, пропорциональная ему по величине [2]. В каждом опыте измерена температура набегающего потока, а температура поверхности цилиндров поддерживалась постоянной. Это позволило рассчитать местные и осредненные КТО по данным градиентной теплотометрии и термометрии. Также в опытах выполнена визуализация течения проводилась с помощью PIV

(Particle Image Velocimetry), что позволило сопоставить данные по теплоотдаче со структурой течения.

На рис. 1 представлены распределение местного числа Нуссельта по верхней полуповерхности второго цилиндра для различных конфигураций.

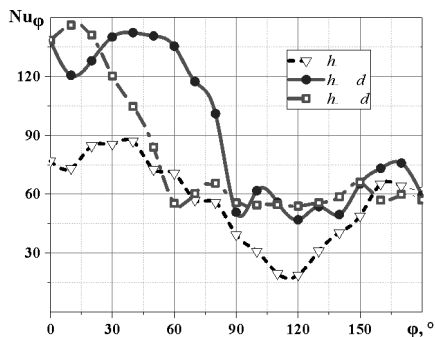


Рис. 1. Распределение местного числа Нуссельта по верхней полуповерхности второго цилиндра при $Re = 9600$ и $S = d$

Вид кривых определяется взаимодействием второго цилиндра с вихрем, сошедшим с первого цилиндра, что подтверждается полем скорости, полученным с помощью PIV. В случае рядного расположения второй цилиндр находится в застойной зоне и интенсивность теплоотдачи здесь минимальна. Сходство кривых наблюдается вблизи кормовой образующей, тогда как положение локальных экстремумов и средние значения отличаются в 1,1...1,5 раза в зависимости от расстояния S . Установлено сходство распределения КТО для конфигурации $h = -d$ для всех исследуемых продольных шагов S , тогда как при $h = 0$ (рядное расположение) и $h = +d$ наблюдается негативное влияние верхнего по потоку цилиндра на распределение местного числа Нуссельта.

Список литературы

1. А.А. Гусаков, М.А. Греков, В.В. Сероштанов. Аэродинамика и теплообмен на поверхности одиночного кольцевого ребра // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. 2018. Т. 11. № 2. С. 151 – 164.
2. Исследование кипения на поверхности шара методом градиентной теплометрии / С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков [и др.] // Тепловые процессы в технике. 2021. Т. 13. № 10. С. 434 – 441.

V. A. Maslov, M. D. Selezneva, V. V. Seroshtanov, A. A. Gusakov, M. A. Grekov
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Russia, 195251, St. Petersburg, Politechnicheskaya, 29

HEAT TRANSFER DURING FLOW AROUND A PAIR OF HEATED CYLINDERS

М.Р. Кучкарова^{1,2}, Н.Д. Паикова^{1,2}, Я.А.Гатаулин³.

¹ Федеральный исследовательский центр Казанский научный центр РАН, 420111, г. Казань, ул. Лобачевского, 2/31, а/я 261

² Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10*

³ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПЕРЕХОД В ОТРЫВНОЙ ОБЛАСТИ ЗА АСИММЕТРИЧНЫМ СУЖЕНИЕМ КАНАЛА

Взаимосвязь между гемодинамикой сердечно сосудистой системы человека и развитием атеросклероза мотивировала большую часть исследований артериального кровотока в последние десятилетия. В стенозированных сосудах высока вероятность развития вторичных областей роста интимы, которая связана с нарушением кровотока в отрывной области за сужением сосуда (стенозом). Причинами этого роста называют низкое поверхностное трение и его высокие градиенты по времени и пространству, которые могут быть вызваны процессами ламинарно-турбулентного перехода. В настоящей работе основное внимание уделяется локальной турбуликации потока в отрывной области за асимметричным сужением канала, моделирующим стеноз артерии.

Объект исследования представлял собой канал с асимметричным сужением, выполненным по гармоническому закону. Каждое проходное сечение канала – окружность, а верхняя образующая – прямая. Диаметр минимального сечения в сужении оставлял 0,55 диаметра канала – $D = 17$ мм. Исследования включали

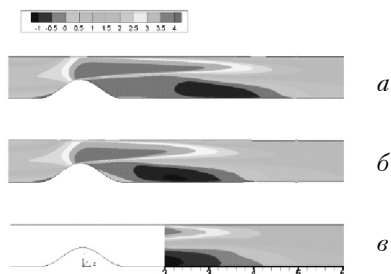


Рис. 1. Поле скорости $U/\langle U \rangle$ за стенозом: *a* – эксперимент; *б* – расчет с входными возмущениями; *в* – расчет без входных возмущений

эксперимент (SIV измерения мгновенных векторных полей скорости) и численное моделирование (решение нестационарных несжимаемых уравнений Навье-Стокса методом крупных вихрей). В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода. Расчеты проводились при отсутствии входных возмущений и при заданном уровне пульсаций скорости на входе 1 %. Число Рейнольдса, рассчитанное по среднерасходной скорости $\langle U \rangle$ и диаметру D в экспериментах и расчетах составляло $Re = 1800$, что соответствует максимальному расходу крови в

бедренной артерии человека за период сердечных сокращений. Продольный размер рециркуляционной области X_1/D без входных возмущений составил 5,3, тогда как с ними – 4,1, что лучше согласуется с результатами измерений. Показано, что максимальная скорость потока в высокоскоростной струе в горле стеноза более чем в 4 раза превышает среднерасходную скорость потока перед сужением. Далее вниз по потоку струя теряет свою интенсивность, размывается, и при $x/D \approx 5$ скорость потока в ней становится сопоставимой со среднерасходной скоростью $\langle U \rangle$. Обнаружены интенсивные вторичные течения в виде парных вихрей, локализованные в пределах отрывной области (рис. 2) в передней части стеноза, где течение происходит по криволинейным линиям тока.

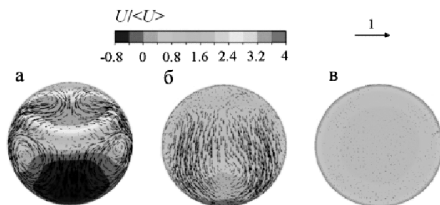


Рис. 2 Расчетное поле продольной скорости с наложенными векторами поперечной скорости в сечениях канала за стенозом: $a - x/D = 2$; $b - 4$; $c - 10$

Заключение

Исследования показали, что за асимметричным сужением формируется замкнутая отрывная область. Слой смешения на внешней границе этой области на некотором расстоянии от горла стеноза теряет устойчивость с образованием локализованной зоны турбулизации потока протяженностью порядка $5d$. Пиковый уровень пульсаций скорости в этой зоне достигает 30 % скорости в горле стеноза. Далее вниз по потоку уровень пульсаций снижается. Обнаружены интенсивные вторичные течения типа вихрей Дина, локализованные в пределах отрывной области. Задание входных возмущений при численном моделировании, близких к условиям эксперимента, позволило получить удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных полей скорости и компонент тензора рейнولدсовых напряжений.

M.R Kuchkarova^{1,2}, N.D. Pashkova^{1,2}, YA.A. Gataulin³

¹ Federal State Budgetary Institution of Science «Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences», 420111 Russian Federation, Tatarstan, Kazan, ul. Lobachevskogo, 2/31

² Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI, 420111, Russian Federation, Tatarstan, Kazan, K. Marksa st., 10

³ Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, 195251, Russian Federation, St. Petersburg, Politechnicheskaya str., 29

LAMINAR-TURBULENT TRANSITION IN THE SEPARATION REGION BEHIND AN ASYMMETRICAL CHANNEL CONTRACTION

**ВЛИЯНИЕ НА ЭФФЕКТ ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЯ РЕЖИМОВ
ОБТЕКАНИЯ ПАРЫ КРУГОВЫХ ЦИЛИНДРОВ
СЖИМАЕМЫМ ПОТОКОМ**

Процесс перераспределения полной энтальпии (температуры торможения) в потоках сжимаемого газа без обмена энергией с окружающей средой принято называть энергоразделением. На его основе созданы устройства для безмашинного разделения потока на холодный и горячий (с температурой торможения меньше и больше начальной), например: трубы Ранка-Хилша, Гартамана-Шпренгера, Леонтьева. Повышение эффективности существующих устройств, проектирование новых, и умелое использование эффекта энергоразделения в обычном теплообменном оборудовании, напрямую связано с пониманием причин энергоразделения, а также способов воздействия на его величину. В связи с этим актуальным является изучение процесса энергоразделения, возникающего при обтекании тел канонической формы (круговых цилиндров), так называемый эффект Эккерта-Вайса [1], который заключается в возникновении области пониженной температуры на подветренной стороне поперечно обтекаемого цилиндра. Величина эффекта может достигать существенных значений. Например, в работе [2] получено, что при числе Маха набегающего потока 0.65 и температуре торможения 25 °С температура поверхности кругового цилиндра снижалась на 28 °С градусов в окрестности задней критической точки и была ниже статической температуры набегающего потока.

Проблема энергоразделения при поперечном обтекании изолированно го цилиндра исследовалась во многих, в основном, экспериментальных работах. Предложенная в [2] связь эффекта Эккерта-Вайса с процессом схода вихрей была неявно подтверждена в работах Куросаки и Томанна. В работе Куросаки было показано, что при возникновении резонанса между частотой стоячих акустических волн в аэродинамической трубе и частотой схода вихрей наблюдается существенное снижение донного давления и температуры поверхности в задней критической точке цилиндра, что косвенно свидетельствовало о связи эффекта с интенсификацией вихрей. При внесении разделительной пластины в область формирования вихрей наблюдалось подавление

*А.Г. Здитовец, zditovets@mail.ru

их интенсивности, резкий рост давления и температуры поверхности в донной области (Томани).

В работе [3] на основе прямого численного моделирования было показано, что эффект Эккерта-Вайса зависит от режима обтекания пары круговых цилиндров поперечным потоком и может быть как больше, так и меньше значений, достигаемых на одиночном цилиндре при идентичных параметрах набегающего потока.

В настоящем докладе приведены данные экспериментального исследования эффекта Эккерта-Вайса при поперечном обтекании пары одинаковых круговых цилиндров при числах Маха набегающего потока $M > 0,3$. Оси цилиндров расположены в плоскости перпендикулярной направлению потока. Относительное расстояние между осями цилиндров изменялось в диапазоне, позволяющем охватить режимы интерференции характерные для данного типа (side-by-side) расположения цилиндров: одиночная вихревая дорожка, бистабильный режим, спаренная вихревая дорожка.

В итоге по измерениям температуры и давления получены распределение коэффициента давления и коэффициента восстановления температуры (характеризующего энергоделение) на поверхности цилиндра. Проведено сравнение результатов, полученных для одиночного цилиндра, с известными экспериментальными данными.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00443, <https://rscf.ru/project/22-29-00443/>

Список литературы

1. **Eckert E., Weise W.** Messungen der Temperaturverteilung auf der Oberfläche schnell angestromter unbeheizter Körper // Forsch. Geb. Ing. Wesen. 1942. (13). С. 246 – 254.
2. **Ryan L.F.** Experiments on Aerodynamic Cooling Swiss Federal Institute of Technology, 1951.
3. **Aleksyuk A.I.** The Eckert – Weise effect and energy separation under the flow interference behind side-by-side cylinders // Journal of Fluid Mechanics. 2021. (915). С. A95. DOI:10.1017/jfm.2021.128.

A.G. Zditovets, N.A. Kiselev, Yu.A. Vinogradov

Lomonosov Moscow State University, Institute of Mechanics, Russia,
Moscow, 119192, Michurinskiy prosp., 1

INFLUENCE ON THE ENERGY SEPARATION EFFECT OF COMPRESSIBLE FLOW REGIMES AROUND A PAIR OF SIDE-BY-SIDE CIRCULAR CYLINDERS

Я.А. Гатаулин¹, А.Н. Михеев²

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29*

² Казанский научный центр Российской академии наук, Россия, 420111, г. Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31

СТРУКТУРА ЛОКАЛЬНО ТУРБУЛЕНТНОГО ТРЕХМЕРНОГО ТЕЧЕНИЯ В ОБЛАСТИ РАЗВЕТВЛЕНИЯ КАНАЛА КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ: ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ РАСХОДОВ НА ВЕТВЯХ

Настоящая работа, как и ранее представленное исследование [1], нацелена на прояснение картины отрывного потока и возникновения турбулентности при протекании крови в анастомозах сосудов по типу конец-в-бок [2].

Средствами физического эксперимента и численного моделирования исследовано стационарное (в среднем) течение, формирующееся в разветвляющемся канале круглого сечения при разном распределении расхода по ветвям: $Q_1/Q_0 = 0,25, 0,5, 0,75$ и 1 (рис. 1); на входе в исследуемую область течение ламинарное, с профилем Пуазейля, $Re = 1475$. Численное решение получено методом моделирования крупных вихрей (LES) по динамической модели Джермано – Лилли для оценки подсеточной вязкости. Эксперимент выполнен с использованием метода SIV [3].

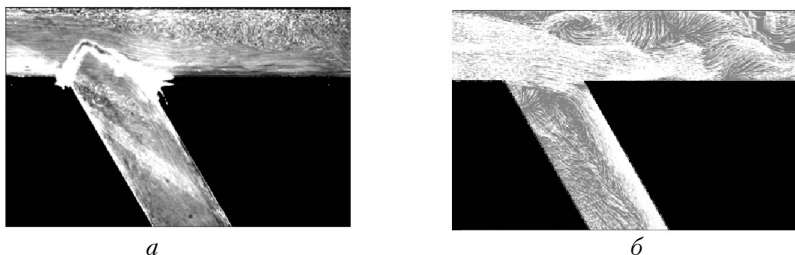


Рис. 1. Визуализация течения в плоскости симметрии канала при $Q_1/Q_0 = 0,5$: а – результат SIV-измерений; б – расчетное поле вектора скорости

Результаты измерений и расчетов согласуются между собой. Установлено, что при $Q_1/Q_0 = 0,5, 0,75$ и 1 в обеих ветвях возникают области локальной турбулентности (рис. 1), а при $Q_1/Q_0 = 0,25$ течение всюду ламинарное. Во всех случаях формируется сложная картина трехмерного течения с рециркуляционными зонами в обеих ветвях. При $Q_1/Q_0 = 1$ (весь расход

* Я.А. Гатаулин, yakov_gataulin@mail.ru

уходит в боковую ветвь) в «прямой» ветви возникают две рециркуляционные зоны, в остальных случаях – по одной рециркуляционной зоне в каждой ветви. Сравнение расчетных и экспериментальных полей скорости и ее пульсаций в целом свидетельствует о полном качественном и удовлетворительном количественном согласовании (рис. 2).

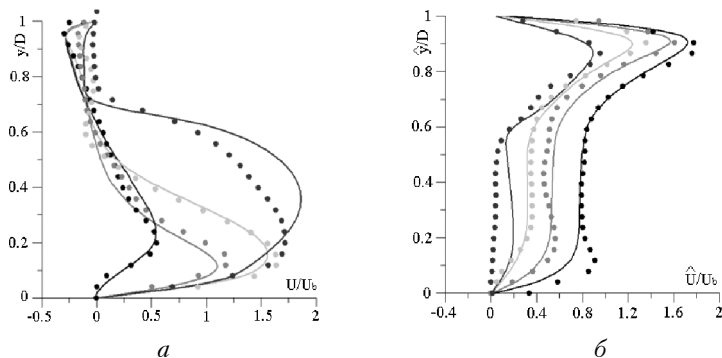


Рис. 2. Профили продольной скорости в прямой (а) и боковой (б) ветвях (линия – расчет, точки – измерения) для $Q_1/Q_0 = 1$ (черный цвет), 0,75 (красный), 0,5 (зеленый), 0,25 (синий); положение сечений и направление оси y показано на рис. 1

Работа выполнена при поддержке РФФ, грант № 20-65-47018.

Список литературы

1. Гатаулин Я.А., Смирнов Е.М., Молочников В.М., Михеев А.Н. Структура трехмерного течения с локальной турбулентностью в области разветвления канала круглого сечения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2022. Т. 15. № 4. С. 81 – 94.
2. Ivanova Y., Yukhnev A., Tikhomolova L., et al. Experience of patient-specific CFD simulation of blood flow in proximal anastomosis for femoral-popliteal bypass // Fluids. 2022. 7, 314. P. 15.
3. Михеев Н.И., Душин Н.С. Метод измерения динамики векторных полей скороститурбулентного потока по видеосъемке дымовой визуализации // Приборы и техника эксперимента. 2016. No 6. С. 114 – 122.

Y.A. Gataulin¹, A.N. Miheev²

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia, 195251, 29 Politechnicheskaya St.

² Federal Research Center 'Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences', Kazan, Tatarstan, Russia, 420111, 2/31, Lobachevsky St.

THE STRUCTURE OF A LOCALLY TURBULENT 3D FLOW IN THE BRANCHING JUNCTURE OF A CIRCULAR-SECTION CHANNEL: EFFECT OF THE FLOW-RATE RATIO

*М.С. Астанина, М.А. Шеремет*Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 36 ***ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНВЕКЦИИ ЖИДКОСТИ
ПЕРЕМЕННОЙ ВЯЗКОСТИ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ
С ПОРИСТОЙ ВСТАВКОЙ**

Изучение процессов конвективного теплообмена с помощью методов математического моделирования является перспективным подходом для изучения тепловых систем. По сравнению с экспериментальными методами численные расчёты требуют намного меньше материальных затрат и предоставляют большие возможности для исследования процессов в силу широкого выбора доступного инструментария. В рамках предлагаемого исследования проводится анализ системы аккумулирования энергии, основанной на использовании пористого рабочего тела [1, 2].

Моделируется конвективное течение ньютоновской жидкости переменной вязкости в прямоугольном канале с пористой вставкой (рис. 1). Течение инициируется набегающим потоком с начальной температурой T_h и скоростью u_0 на входе в канал. Горизонтальные стенки рассматриваемой области являются теплоизолированными.

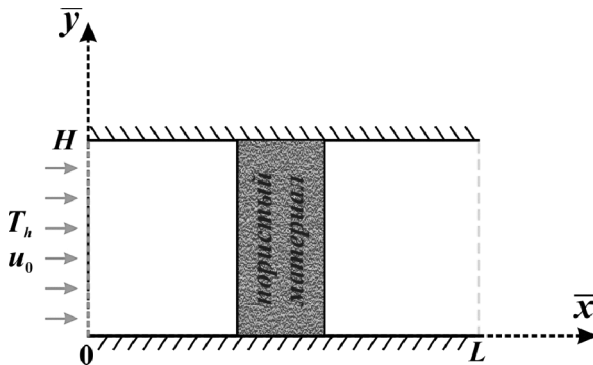


Рис. 1. Схема решаемой задачи

* М.С. Астанина, astanina.marina@bk.ru

Моделирование пористой среды проводилось на основе модели Дарси-Бринкмана-Форхгеймера и локально-равновесной тепловой модели, в рамках которой температуры твёрдой матрицы пористого материала и жидкости считаются одинаковыми. Вязкость рабочей среды считается зависимой от температуры по экспоненциальному закону.

Определяющие уравнения были сформулированы с использованием безразмерных переменных «функция тока – завихрённость – температура» и решены с помощью метода конечных разностей [3]. Для реализации метода решения был разработан вычислительный код на языке программирования C++.

По результатам численных экспериментов было показано влияние определяющих параметров системы на распределения изотерм и изолиний функции тока внутри канала, а также на характеристики режимов зарядки и разрядки пористого материала как теплоаккумулирующего элемента. Режим зарядки – первый этап течения в канале при подаче потока с высокой температурой, режим разрядки – второй этап течения при подаче потока с низкой температурой. В этом случае изучаемой характеристикой являлась средняя температура пористой вставки.

Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

Список литературы

1. **Anjum I., Azeem B., Khan T.M.Y., Baig M.A.A.B.** Heat Transfer in Porous Media: A Mini Review // *Materials Today: Proceedings*. 2020. V. 24. Pp. 597–608.
2. **Hrifech S., Agalit H., Jarni A., El Mostafa Moughuina, Grosud Y., Faik A., El Ghali Bennouna, Mimet A.** Characterization of natural rocks as filler materials for medium-temperature packed bed thermal energy storage system // *Journal of Energy Storage*. 2020. V. 32. 101822.
3. **Астанина М.С., Шеревет М.А.** Моделирование смешанной конвекции жидкости с переменной вязкостью в частично пористом горизонтальном канале с источником тепловыделения // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2019. Т. 11, № 1. С. 95–107.

M.S. Astanina, M.A. Sheremet

National Research Tomsk State University
Russia, 634050 Tomsk, Lenina Ave., 36

NUMERICAL SIMULATION OF CONVECTION OF FLUID WITH VARIABLE VISCOSITY IN A FLAT CHANNEL WITH A POROUS INSERT

Е.В. Шулепова, М.А. Шеремет

Томский государственный университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 36 *

ЕСТЕСТВЕННАЯ КОНВЕКЦИЯ И ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В ДВУСВЯЗНОЙ ОБЛАСТИ С ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ

Естественная конвекция и тепловое излучение представляют значительный интерес для ученых и исследователей из-за широкого спектра геофизических и инженерных приложений, в которых происходит свободно-конвективный теплообмен внутри полости, заполненной рабочей жидкостью, при наличии локальных источников энергии. К таким приложениям можно отнести задачи охлаждения тепловыделяющих элементов электронной техники, оптимизации некоторых производственных процессов, моделирования системы отопления в элементах строительной застройки [1, 2].

Цель представленной работы – математическое моделирование и численный анализ свободно-конвективного теплопереноса и поверхностного излучения в двусвязной полости с внутренним тепловыделяющим элементом, адиабатическими горизонтальными стенками и изотермическими вертикальными границами. Специфика рассматриваемой постановки выражается в наличии внутреннего тепловыделяющего источника, не связанного с внешними границами полости, что требует детального изучения при использовании двух-полевого метода [3] решения задач гидродинамики и теплопереноса.

Проведение численных исследований проходило в рамках механики сплошной среды с применением основных законов сохранения массы, импульса и энергии. Ньютоновская теплопроводная жидкость циркулирует внутри двусвязной области вследствие влияния внутреннего тепловыделяющего элемента, изотермических вертикальных стенок и ориентации силы тяжести. Предполагается, что условия применения приближения Буссинеска выполнены.

Математическая постановка задачи включает дифференциальные уравнения в частных производных Обербека – Буссинеска, описывающие гидродинамику и теплоперенос в рассматриваемой области решения, нестационарное уравнение теплопроводности с источниковым членом внутри тепловыделяющего элемента, а также начальные и граничные условия [4]. Вычисление угловых коэффициентов производится при помощи метода натянутых нитей Хоттеля [5]. Краевая задача формулируется с использованием безразмерных

* Е.В. Шулепова, elena.vasilevna.1996@mail.ru

преобразованных переменных «функция тока – завихренность». Решение проводится на основе метода конечных разностей.

При решении задач конвективного теплопереноса на основе двухполюсового метода [3] появляются сложности с нахождением значения функции тока на поверхностях внутренних элементов. В данной работе для определения этого значения была применена ранее разработанная специальная процедура, которая основана на однозначности поля давления вдоль внутренней поверхности блока [6].

Разработанный вычислительный код был апробирован на множестве сеток, а также с использованием численных и экспериментальных данных других авторов при решении некоторых модельных задач.

Численные исследования проведены в широком диапазоне изменения определяющих параметров: число Рэлея ($Ra = 10^4 - 10^6$), число Прандтля ($Pr = 0,7$).

В результате моделирования получены распределения изолиний функции тока, температуры и завихренности, характеризующие особенности анализируемого процесса.

Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

Список литературы

1. **Dihmani N., Amraqui S., Mezrhab A., Naji H.** Numerical Modeling of Natural Convection-Radiation in a Vertical Vented Channel // Journal of Thermophysics and Heat Transfer. 2013. Vol. 27. No. 1. P. 91 – 100.
2. **Mezrhab A., Bouali H., Amaoui H., Bouzidi M.** Computation of combined natural-convection and radiation heat-transfer in a cavity having a square body at its center // Applied Energy. 2006. Vol. 83. No. 9. P. 1004 – 1023.
3. **Тарунин Е.Л.** Двухполюсовый метод решения задач гидродинамики вязкой жидкости. Пермь, 1985. 88 с.
4. **Sivaraj C., Miroshnichenko I.V., Sheremet M.A.** Influence of thermal radiation on thermogravitational convection in a tilted chamber having heat-producing solid body // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2020. Vol. 115. – 104611.
5. Теплообмен излучением / Пер. с англ. Р. Зигель, Дж. Хауэлл; Под ред. д-ра техн. наук Б.А. Хрусталева. М.: Мир, 1975. 934 с.
6. **Pop I., Sheremet M.A., Grosan T.** Thermal convection of nanoliquid in a double-connected chamber // Nanomaterials. 2020. Vol. 10. No. 588.

E. V. Shulepova, M.A. Sheremet

Tomsk State University, 36 Lenin Avenue, 634050, Tomsk,

NATURAL CONVECTION AND THERMAL RADIATION IN A DOUBLY-CONNECTED REGION WITH A HEAT-GENERATING ELEMENT

Д.С. Лоенко, М.А. Шеремет

Томский государственный университет, научно-исследовательская лаборатория моделирования процессов конвективного теплопереноса, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 36*

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОРИСТЫХ / ТВЕРДЫХ РЕБЕР НА ОХЛАЖДЕНИЕ ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА В УСЛОВИЯХ ЦИРКУЛЯЦИИ СТЕПЕННОЙ НАНОЖИДКОСТИ

Интенсификация теплообмена является актуальной проблемой во многих технических приложениях, таких как: конструирование теплообменников, обогрев / охлаждение различных построек, охлаждение электронных элементов и ядерных реакторов, создание солнечных коллекторов [1]. Исследователи применяют различные способы, помогающие решить эту задачу. Например, включение малой концентрации частиц из высокотеплопроводных материалов в базовую рабочую жидкость позволяет повысить ее теплопроводность. Наличие ребренной конструкции в системе охлаждения позволяет отвести и равномерно распределить большее количество тепла от нагретого элемента.

Предлагаемое исследование посвящено изучению возможности интенсификации конвективного теплопереноса степенной наножидкости с помощью включения ребер из твердого или пористого материала в состав системы охлаждения локального источника постоянного объемного тепловыделения (рис. 1). Также проанализировано влияние объемной доли наночастиц, толщины, высоты и количества ребер на интенсивность теплоотвода.

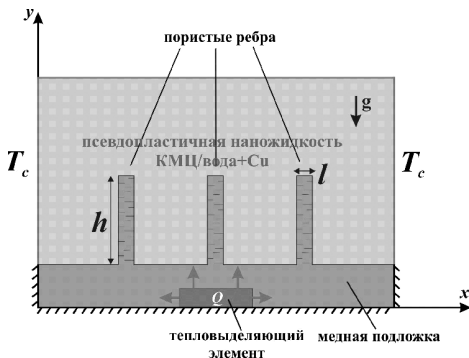


Рис. 1. Область решения задачи

* Д.С. Лоенко, d.s.loenko@mail.tsu.ru

Исследуемая полость заполнена неньютоновской степенной наножидкостью. В качестве базовой неньютоновской среды использовалась смесь карбоксилметилцеллюлозы с водой, которая проявляет псевдопластические свойства. В качестве материала нанодобавок были использованы медные частицы. Характеристики базовой смеси и материала наночастиц представлены в [2].

Неньютоновский характер поведения базовой жидкости описывался степенной моделью Оствальда-де-Вилля [3]. Для вычисления эффективных параметров наносuspензии были использованы экспериментальные корреляции, отражающие влияние температуры. Математическая модель построена с использованием законов сохранения массы, импульса и энергии в преобразованных безразмерных переменных «функция тока – завихренность» на основе приближения Буссинеска для описания влияния выталкивающей силы и модели Дарси–Бринкмана для описания транспортных процессов внутри пористых ребер. Численное моделирование было проведено с использованием метода конечных разностей. Полученные результаты проанализированы по распределениям линий тока и изотерм в полости, а также на основе зависимости средней температуры в источнике от времени и определяющих параметров.

Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

Список литературы

1. **Xu H.J., Xing Z.B., Wang F.Q., Cheng Z.M.** Review on heat conduction, heat convection, thermal radiation and phase change heat transfer of nanofluids in porous media: Fundamentals and applications // *Chemical Engineering Science*. 2019. Vol. 195(23). Pp. 462 – 483.
2. **Maleki H., Safaei M.R., Alrashed A.A.A.A., Kasaeian A.** Flow and heat transfer in non-Newtonian nanofluids over porous surfaces // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2019. Vol. 135. Pp. 1655 – 1666.
3. **Лоенко Д.С., Шеремет М.А.** Численное моделирование естественной конвекции неньютоновской жидкости в замкнутой полости // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2020. Т. 12. № 1. С. 59 – 72.

D.S. Loenko, M.A. Sheremet

Tomsk State University, Laboratory on Convective Heat and Mass Transfer,
Tomsk, 634050, 36 Lenin av.

INFLUENCE OF POROUS/SOLID FINS ON COOLING OF HEAT-GENERATING ELEMENT UNDER CIRCULATION OF POWER-LAW NANOFLUID

В.Г. Луцкич, М.С. Макарова, С.С. Попович

НИИ механики Московского государственного университета
им. М.В. Ломоносова, 119192, г. Москва, Мичуринский проспект, д. 1*

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ С ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМ ГРАДИЕНТОМ ДАВЛЕНИЯ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ

Разработке методов расчета турбулентного пограничного слоя в сверхзвуковом потоке посвящено большое число работ, обзор которых представлен в [1]. Наиболее распространены в инженерной практике интегральные методы расчета, основанные на использовании интегральных соотношений импульса и энергии, замкнутых алгебраическими соотношениями для коэффициента трения, формпараметра и числа Стантона. Отметим, что недостатки интегральных методов расчета известны: необходимость использования эмпирической информации о виде профилей скорости и температуры, недостаточная универсальность при существенном изменении граничных условий, например, теплового режима стенки. Это обусловило переход от интегральных методов расчета к дифференциальным, обзор которых для сверхзвукового пограничного слоя также содержится в [1].

Целью настоящей работы является численное исследование турбулентного пограничного слоя в сверхзвуковом потоке с переменным по длине числом Маха, генерирующим положительный градиент давления (ПГД), который характеризуется следующими параметрами, используемыми и в дозвуковом пограничном слое с ПГД [2]: параметр градиента давления $\beta = (\delta^* \cdot dP / dx) / \tau_w$, где δ^* – толщина вытеснения; P – статическое давление; x – координата в направлении потока; τ_w – напряжение сдвига на стенке; параметр ускорения (торможения) $K = (v \cdot dU_1 / dx) / U_1^2$, где U_1 – локальная скорость набегающего потока. В расчетах была использована трёхпараметрическая дифференциальная RANS-модель сдвиговой турбулентности [3]. Положительный градиент давления был реализован за счет уменьшения числа Маха по длине пластины.

Для теплоизолированной стенки проведено обобщение относительной величины коэффициента трения C_f / C_{f0} по параметру градиента давления β , которое можно считать успешным в отличие от обобщения по параметру

* С.С. Попович, pss@imec.msu.ru

торможения потока K , где расслоение расчетных зависимостей для разных законов изменения числа Маха значительное. Результаты численного исследования влияния положительного градиента давления на профили скорости в пограничном слое свидетельствуют о том, что это влияние существенно в основной части пограничного слоя и слабое в пристеночной области. Профили интенсивности турбулентности свидетельствуют о существенной турбулизации пограничного слоя с ростом положительного градиента давления по сравнению с безградиентным пограничным слоем.

В случае нетеплоизолированной стенки обобщение относительной величины коэффициента трения C_f/C_{f0} по параметру градиента давления β для охлаждаемой стенки при значении теплового фактора $\theta = 0,5$ более успешно, чем для нагреваемой стенки при $\theta = 1,5$. Что касается обобщения результатов расчета по параметру торможения потока K , то расслоение расчетных зависимостей, как и в случае теплоизолированной стенки, значительное. Влияние положительного градиента давления в сверхзвуковом потоке на профили скорости аналогично случаю теплоизолированной стенки. Профили интенсивности турбулентности, как и в случае теплоизолированной и охлаждаемой стенки свидетельствуют о существенной турбулизации пограничного слоя с ростом положительного градиента давления. Коэффициент аналогии Рейнольдса существенно зависит от параметра градиента давления β и результаты расчетов для четырех законов изменения числа Маха набегающего потока и значений температурного фактора $\theta = 0,5-1,5$ достаточно хорошо обобщаются.

Работа выполнена в рамках исследований, финансируемых Российской научным фондом (грант № 19-79-10213).

Список литературы

1. **Monty J.P., Harun Z., Marusic I.** A parametric study of adverse gradient turbulent boundary layers // Int. Journal of Heat and Fluid Flow. 2011. Vol. 32. P. 575-585.
2. **Лущик В.Г., Макарова М.С.** Численное моделирование турбулентного пограничного слоя с положительным градиентом давления // Изв. РАН. МЖГ. 2022. № 3. С. 102-114.
3. **Лущик В.Г., Павельев А.А., Якубенко А.Е.** Трехпараметрическая модель сдвиговой турбулентности // Изв. АН СССР. МЖГ. 1978. № 3. С. 13-25.

V.G. Lushchik, M.S. Makarova, S.S. Popovich

Institute of Mechanics of Lomonosov Moscow State University,
Russia, 119192, Moscow, Michurinsky pr. 1

**NUMERICAL STUDY OF TURBULENT BOUNDARY LAYER
WITH ADVERSE PRESSURE GRADIENT IN SUPERSONIC FLOW**

Н.А. Лучинкин¹, Н.Г. Разуванов², О.Н. Полянская²

¹ Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», 111111, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14

² Объединенный институт высоких температур РАН, 111116, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 17А *

ТЕПЛООБМЕН ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В СИСТЕМЕ «КАНАЛ-ТРУБА» В ПОПЕРЕЧНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Жидкие металлы находят свое применение во многих перспективных реакторных установках: охлаждение активной зоны реакторов на быстрых нейтронах, экспериментальных модулей blankets ИТЭР, blankets гибридного реактора (термоядерного источника нейтронов).

Помимо использования жидкометаллических теплоносителей, имеет место применение комбинированных систем охлаждения, геометрия которых предполагает использование двойных каналов, когда конструкцию blanket пропихивают трубы с текущим теплоносителем, а межтрубное пространство заполнено средой неподвижного ЖМ с невысоким давлением.

Существующий ЖМ комплекс, состоящий из трех ртутных МГД-стендов, расположенных в НИУ МЭИ и ОИВТ РАН позволяет изучать МГД и теплообмен в не исследованных ранее конфигурациях неизотермического течения в продольном или поперечных магнитных полях. Применение зондовых методик измерений позволяет получать более надежные данные и переносить их методами подобия на реальные теплоносители, а также верифицировать расчетные коды.

В работе рассматривается комбинированный канал с двойными стенками «канал – труба» (рис. 1): в трубе – вынужденное течение, в межтрубном пространстве – свободно-конвективное или магнито-конвективное. Внешний канал был подключен к петле естественной циркуляции, которая могла перекрываться запорным вентилем. Измерения проводились при однородном обогреве стенок канала, в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = (1-9) \cdot 10^4$, Грасгофа Gr до 10^8 , в поперечном МП с числами Гартмана $Ha = 0-470$. Эксперименты проводились в следующем порядке: I – петля естественной циркуляции перекрыта; II – петля естественной циркуляции полностью открыта, охлаждение выключено; III – петля открыта полностью, охлаждение включено.

* Н.А. Лучинкин, LuchinkinNA@yandex.ru

Н.В. Пальчеховская^{1,2}¹ Московский физико-технический институт,
141701, Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9² Центральный аэрогидродинамический институт,
140180, г. Жуковский, ул. Жуковского, д. 1

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОСПРИИМЧИВОСТИ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ К ЭНТРОПИЙНЫМ И ВИХРЕВЫМ ВОЗМУЩЕНИЯМ

В данной работе анализируется восприимчивость пограничного слоя на плоской пластине в потоке с числом Маха 6 к энтропийным и вихревым возмущениям в набегающем потоке при различных углах атаки (AoA). Энтропийные волны и волны завихренности, проходя через головную ударную волну или скачок уплотнения возбуждают доминирующие моды F и S в небольшой окрестности передней кромки пластины. Они распространяются вниз по течению в соответствии с моделью двухмодового приближения, учитывающей непараллельные эффекты среднего течения и механизм межмодового обмена. Перекрестное сравнение начальных амплитуд возбужденных мод помогает оценить относительную роль энтропийных и вихревых волн в переходе с преобладанием второй моды, а также сравнить их воздействие со случаем акустических возмущений, который был исследован ранее.

Рассматривается двумерное сверхзвуковое нестационарное течение калорически идеального газа на верхней поверхности плоской пластины под различными углами атаки (AoA). Плоская волна энтропии (E) или завихренности (V) с фиксированной угловой частотой ω^* распространяется в свободном потоке с фазовой скоростью $c^* = c_\infty^*$. Предполагается, что амплитуда волны настолько мала, что поле возмущений может быть описано линейной теорией. Взаимодействие волн E или V с неоднородным средним течением моделируется с помощью прямого численного моделирования (DNS) на основе уравнений Навье-Стокса. Численные результаты сравниваются с теоретическими предсказаниями, основанными на модели двумодового приближения TMA.

Вычисления проводятся при следующих параметрах набегающего потока: $M_\infty = 6$, $Re_\infty = 3 \cdot 10^7$, $AoA = -5^\circ, 0, 5^\circ$. Безразмерная температура стенки $T_w = 2.46$. Частоты возмущений выбраны так, чтобы интегральные усиления моды S были примерно равны $N \approx 8.4$, что соответствует переходу в слабо-возмущенной среде.

Достаточно трудно сравнивать восприимчивость к энтропийным, вихревым и акустическим волнам из-за их различной физической природы. Тем не менее, распределения DNS нормализованы на амплитуду возмущений в набегающем потоке, и их сравнение приведено для случая $\text{AoA} = 0$ на рис. 1.

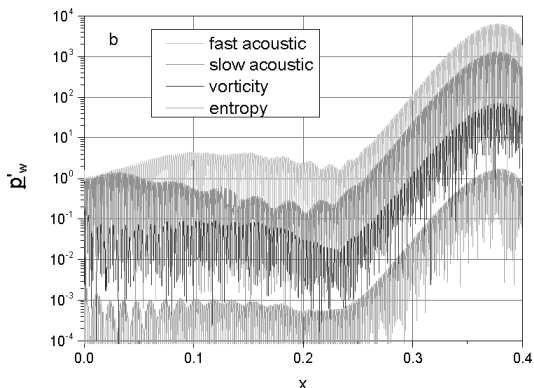


Рис. 1. Сравнение решений DNS при $\text{AoA} = 0^\circ$ для быстрых и медленных акустических волн, волны завихренности и волны энтропии

Нормированные начальные амплитуды, которые можно рассматривать как коэффициенты восприимчивости на передней кромке, уменьшаются примерно на порядок величины при переходе от акустических волн к волнам завихренности и затем к энтропийным волнам. Эта иерархия согласуется с теоретическими предсказаниями [1, 2].

Список литературы

1. **Fedorov, A.V., Khokhlov, A.P.** Excitation and evolution of unstable disturbances in supersonic boundary layer / In Proc. ASME Fluid Engng Conf. FED. 1993. 151. P. 1 – 13.
2. **Fedorov, A. V.** Receptivity of a high-speed boundary layer to acoustic disturbances // J. Fluid Mech. 2003. 491, P. 101 – 129.

N.V. Palchekovskaya^{1,2}

¹ Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT), 9 Institutsky per., Dolgoprudny, Moscow reg., 141701, Russia

² Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI), 1 Zhukovskogo Str., Zhukovsky, Moscow reg., 140180, Russia

NUMERICAL SIMULATION OF THE SUPERSONIC BOUNDARY LAYER RECEPTIVITY TO ENTROPY AND VORTEX DISTURBANCES

О.В. Митрофанова^{1,2}, И.Г. Поздеева^{1,2}, Н.А. Старовойтов²

¹ Национальный исследовательский центр «Курчатовский Институт»,
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1,

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
115409, г. Москва, Каширское ш., д. 31*

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ПЕРЕХОДА К РЕЗОНАНСНОМУ РЕЖИМУ НА ПРИМЕРЕ ИМПАКТНОГО ЗАКРУЧЕННОГО ТЕЧЕНИЯ

Исследовались условия возникновения резонанса вихревых структур с собственными частотами гидромеханической системы. В качестве модельного процесса рассматривались процессы вихреобразования в импактной закрученной струе при возбуждении изгибных колебаний нижней поверхности выходной щели (рис. 1). Эксперименты проводились на газодинамическом стенде. Закрученный воздушный поток покидал объем вихревой камеры через большое отверстие диаметром d_0 в верхней крышке камеры диаметром $D_{кр}$ и толщиной $\delta_{кр}$ и ударял по преграде, выполненной в форме плоского диска диаметром D . Ширина выходной щели δ между крышкой вихревой камеры и преградой не фиксировалась, также диск мог свободно вращаться вокруг оси. Крышка вихревой камеры была выполнена из упругого материала – плексигласа, и при определенных условиях в ней возникали изгибные колебания, которые приводили к колебанию объема выходной щели.

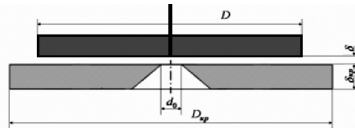


Рис. 1. Геометрия рабочего участка

По характеру регистрируемых в процессе экспериментов акустических колебаний было выделено два режима истечения импактной закрученной струи: звуковой дорезонансный и резонансный.

На рис. 2 показан переход к резонансному режиму: линия 1 – колебание с одной характерной частотой (временная метка 13 мин 38.275 с., частота колебания 719 Гц (рис. 3, а), мощность акустического излучения 0,12 Вт/м²) переходит через переходной процесс 2 – сложение двух колебаний (временная метка 13 мин 38.301 с., частоты 703 Гц и 2125 Гц (рис 3, б), мощность

* И.Г. Поздеева, pozdeeva_irina@mail.ru

акустического излучения $0,41 \text{ Вт/м}^2$) в резонансный режим 3 – доминирующее колебание на собственной частоте крышки вихревой камеры (временная метка 13 мин. 38.321 с., частота 2125 Гц (рис. 3, в), мощность акустического излучения $2,24 \text{ Вт/м}^2$). Таким образом, за $0,046 \text{ с.}$ мощность акустического излучения возрастает 18,7 раз.



Рис. 2. Временная развертка акустической волны при переходном процессе

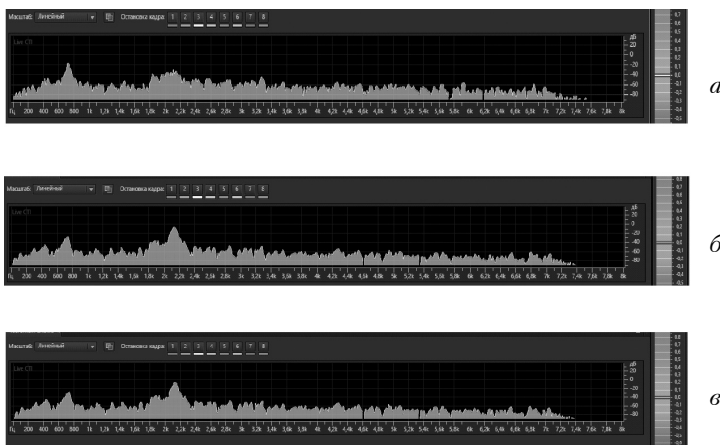


Рис 3. Амплитудно-частотные характеристики акустических колебаний:
а – линия 1; б – линия 2; в – линия 3

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00373, <https://rscf.ru/project/23-29-00373/>.

O. V. Mitrofanova^{1,2}, I. G. Pozdeeva^{1,2}, Starovoytov N. A.²

¹ National Research Center «Kurchatov Institute», Russia, 123182 Moscow, Akademika Kurchatova pl., 1,

² National Nuclear Research University «МЭФИ», Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe hwy, 31

INVESTIGATION OF THE CONDITIONS OF TRANSITION TO THE RESONANT MODE ON THE EXAMPLE OF AN IMPACT SWIRL FLOW

Д.Е. Хазов, С.С. Попович, Ю.А. Виноградов

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

ТЕПЛООБМЕН И ТРЕНИЕ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ В ОБЛАСТЯХ ОТРЫВНОГО ТЕЧЕНИЯ ПРИ СВЕРХЗВУКОВЫХ СКОРОСТЯХ

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 (рис. 1). 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 взаимодействии 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].

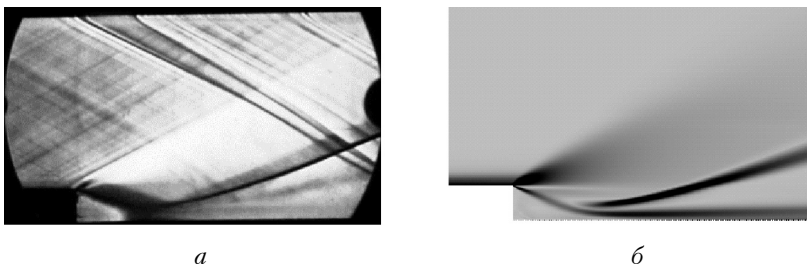


Рис. 1. Визуализация картины течения сверхзвукового потока за уступом:
а – эксперимент [4]; *б* – расчёт

В данной работе проводится численное моделирование сверхзвукового турбулентного обтекания как прямой, так и обратной ступенек. На базе двумерных уравнений Навье-Стокса, осреднённых по Рейнольдсу построены математические модели, описывающие сверхзвуковые течения около прямой

и обратной ступенек. На основе доступных экспериментальных данных [5, 6] проводится валидация разработанных численных моделей. Анализируется влияние модели переменного турбулентного числа Прандтля на результаты моделирования. Проводятся параметрические исследования по влиянию высоты ступеньки на изменение коэффициента восстановления температуры. В качестве рабочего тела рассматривается воздух, а также газовые смеси с низким значением молекулярного числа Прандтля.

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. **Leontiev A.I., Zditovets A.G., Vinogradov Yu. A., Strongin M.M., and 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*, (88):202–219, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2017.05.021>
2. **Khazov D.E., Leontiev A.I., Zditovets A.G., Kiselev N.A., and Vinogradov Yu A.** Energy separation in a channel with permeable wall. *Energy*, 239:122427, 2022. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122427>
3. **Dolling D.S.** Fifty Years of Shock-Wave/Boundary-Layer Interaction Research: What Next? // *AIAA Journal*. 2001. № 8 (39). С. 1517 – 1531. <https://doi.org/10.2514/2.1476>
4. **Ligrani P.M., Oliveira M.M., Blaskovich T.** Comparison of Heat Transfer Augmentation Techniques // *AIAA Journal*. 2003. № 3 (41). С. 337 – 362. <https://doi.org/10.2514/2.1964>
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. **Попович С.С.** Аэродинамическое охлаждение стенки при течении сверхзвукового потока в следе за обратным уступом. Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2019. № 20 (1). С. 1 – 11. <http://doi.org/10.33257/PhChGD.20.1.781>

D.E. Khazov, S.S. Popovich, Yu.A. Vinogradov

Lomonosov Moscow State University, Institute of Mechanics,
Russia 119192 Moscow, Michurinsky prospekt, 1

HEAT TRANSFER AND SKIN FRICTION FOR A TURBULENT BOUNDARY LAYER IN REGIONS OF SEPARATED FLOW

С.В. Веретенников, Д.А. Бумагин,

Рыбинский государственный технический университет имени П.А. Соловьева
152934, Ярославская обл., г. Рыбинск, ул. Пушкина, д. 53

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В ВИХРЕВОЙ ТРУБЕ

Известно, что вихревой эффект напрямую зависит от структуры закрученного потока, пульсаций, нестационарных и других процессов. Для определения условий генерации спиралевидных вихревых структур формирующихся в противоточном закрученном течении вихревой трубы выполнены комплексные расчетные и экспериментальные исследования. Условно закрученное течение в вихревой трубе можно разбить на три зоны (участка). На начальном этапе витки расположены настолько плотно, что невозможно выделить спиралевидный жгут. На втором основном участке можно наблюдать четко сформированный спиралевидный жгут вращающийся в периферийной зоне. На этом участке возможно оценить шаг винтовой линии и параметры спирального вихря в поперечном сечении. Начало третьего участка, где происходит распад спиралевидного вихревого жгута, связано с образованием осевого противоточного течения. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что уже при перепаде давления $\pi = 1,3$ можно наблюдать генерацию спиралевидных структур в камере энергоразделения вихревой трубы, хотя протяженность участка незначительна. Это минимальный перепад давления при котором спиралевидные структуры формируются. При меньших перепадах давления устойчивого вихревого жгута в периферийной зоне не визуализируется. С увеличением перепада давления уменьшается протяженность начального участка и увеличивается протяженность основного. При этом можно наблюдать увеличение площади сечения вихревого жгута. При перепаде давления $\pi < 1,5$ сдвиговые скорости приосевого и периферийного потоков в начале и середине камеры энергоразделения практически совпадают.

Кроме перепада давления на генерацию спиралевидных структур в закрученном потоке существенное влияние оказывает интенсивность осевого противоточного течения (величина сдвига осевой скорости). Данный параметр пропорционален относительной доле охлажденного (приосевого) потока. В связи с этим для двух перепадов давления $\pi = 1,5$ и $\pi = 6,0$ были выполнены расчеты с дискретным изменением параметра интенсивности осевого противоточного течения $\mu = 0,0; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 1$. Анализ

полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что при относительной доле охлажденного потока $\mu = 0,0 \dots 0,1$ генерация вихревых структур происходит, однако формирующиеся жгуты нестабильны и разрушаются, имеется протяженный начальный участок, длина основного участка порядка 1...2 калибров. Это свойственно всем перепадам давления. Максимальные сдвиговые скорости периферийного и приосевого течений реализуются при относительной доле охлажденного потока $\mu = 0,6, 0,8$ и достигают величины 0,46 от скорости на выходе из закручивающего устройства. Отмеченный диапазон μ соответствует наиболее эффективным режимам работы вихревой трубы по энергоразделению, что подтверждает непосредственное влияние взаимодействия периферийного и приосевого потоков на температурную стратификацию.

Таким образом, можно сделать заключение, что генерация спиралевидной структуры происходит на всех режимах работы вихревой трубы при разной степени интенсивности осевого противоточного течения, отличается лишь протяженность зоны их характерного присутствия. Наличие крупномасштабных вихревых структур и протяженность основной зоны определяет качество процесса энергоразделения. Так как именно в области основного участка происходит интенсивный обмен энергией между приосевым и периферийным вихрем, осуществляются так называемые микроохладительные циклы. Таким образом, на генерацию крупномасштабных вихревых структур существенное влияние оказывают режимные (перепад давления на трубе и интенсивность осевого противоточного течения) и геометрические параметры (в частности количество тангенциальных подводов).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-08-01199.

Список литературы

1. **Пиралишвили, Ш.А.** Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения / Ш.А.Пиралишвили, В.М. Поляев, М.Н. Сергеев / Под. ред. А.И. Леонтьева. М.: УНПЦ «Энергомаш», 2000. 412 с.

D.A. Bumagin, S.V. Veretennikov

Soloviev Rybinsk State Aviation Technical University
Russia, Rybinsk, 152934, Pushkin, 53

TEMPLATE FOR PREPARING OF EXTENDED ABSTRACT

Р.Р. Шакиров

Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН»,
420111, Россия, г. Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31

КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В ПЛОСКИХ РАСШИРЯЮЩИХСЯ КАНАЛАХ

Аннотация. Выполнено экспериментальное исследование конвективно-теплообмена в условиях продольного положительного градиента давления в диффузорных каналах. Определены распределения коэффициента теплоотдачи вдоль нагретой стенки и проведен сравнительный анализ теплообмена в градиентном и безградиентном потоке. Выявлены общие закономерности теплообмена в расширяющихся каналах. В процессе обобщения результатов измерений получены новые критериальные зависимости, представляющие широкий научный и практический интерес.

Описание экспериментальной установки. Аэродинамическая установка состояла из рабочего участка (рис. 1), компрессора и расходного блока с критическими соплами. При помощи открытия/закрытия критических сопел разного диаметра происходило дозирование объемного расхода воздуха с высокой точностью. Рабочий участок представлял собой диффузорный канал прямоугольного сечения. Канал имел длину $L = 1800$ мм и ширину $B = 150$ мм. Степень расширения диффузора регулировалась отклонением верхней стенки 2 на постоянный угол φ относительно горизонтальной плоскости. В ходе экспериментов значения φ варьировались в пределах $0,38 - 5,3^\circ$. На входе в канал высотой H_0 было установлено плавное сужающееся устройство 1. Измерение локальных величин коэффициента теплоотдачи производилось относительно нижней стенки канала.

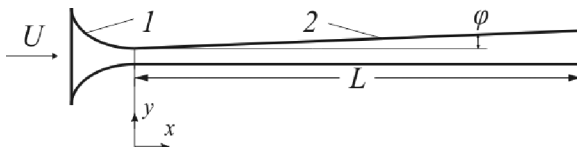


Рис. 1. Схема рабочего участка:

1 – входное устройство; 2 – регулируемая верхняя стенка

Метод измерения распределения теплоотдачи на стенке. Метод измерения теплоотдачи [1] основан на использовании нагреваемых печатных

плат в качестве стенки плоского канала. На поверхность печатных плат нанесены медные дорожки. Стационарный нагрев дорожек электрическим током, в момент обтекания стенки теплоносителем с температурой T_f , реализует тепловое граничное условие II рода на границе раздела двух сред с постоянным тепловым потоком $q = \text{const}$. Каждая дорожка в свою очередь является термометром сопротивления и может измерять локальную температуру стенки T_w . Коэффициент теплоотдачи α для каждой из дорожек определяется из соотношения:

$$q = \alpha(T_w - T_f). \quad (1)$$

Закключение. В ходе экспериментальных исследований по теплоотдаче в плоских диффузорах было установлено, что наилучшим образом результаты обобщаются по аналогии с безградиентным потоком на пластине в виде зависимости числа Стэнтона $St = \alpha/(\rho c_p U_0)$ от числа Рейнольдса $Re = U_0 x/\nu$, определенного по продольной координате x , где ρ – плотность; c_p – изобарная теплоемкость и ν – кинематическая вязкость жидкости. Результаты показали, что в диффузорах определяющим скоростным параметром при обобщении теплоотдачи является скорость потока на входе U_0 . В ходе обобщения экспериментальных данных получены критериальные зависимости в виде $St \sim f(Re, K)$, где K – параметр ускорения Кейса $K = \text{tg}\varphi/Re_0$, $Re_0 = U_0 H_0/\nu$. Предложенные критериальные зависимости справедливы для ламинарных и турбулентных течений в широком диапазоне величин параметра ускорения Кейса и могут быть использованы при проведении теплообменных расчетов.

Список литературы

1. Давлетшин И.А. Метод измерения коэффициента теплоотдачи на плоской стенке //Теплофизика высоких температур. 2022. Т. 60. №. 3. С. 443-447.

R.R. Shakirov

Federal state institution of science
«Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences»
Russia 420111 Kazan, Lobachevsky Street, 2/31

CONVECTIVE HEAT TRANSFER IN PLANE EXPANDING CHANNEL

М.А. Соколов¹, Н.Г. Разуванов^{1,2}

¹Объединенный институт высоких температур РАН,
125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13 *

²Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В ПРОДОЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Известно, что жидкие металлы и расплавы солей рассматриваются как перспективные теплоносители для охлаждения различных элементов термоядерных установок. Так, геометрия blankets включает в себя системы каналов, включающие в себя различные нестандартные элементы трубопроводов. В частности весьма малоизученной темой остается течение жидкого металла при внезапном расширении, следствием которой является возникновение затопленной струи.

В работе рассматривается вертикальная составная труба, каждая часть которой имеет определенный диаметр. Реализовывалось вынужденное подъемное течение ртути, при котором возникала затопленная жидкометаллическая струя. Струя формируется в области однородного постоянного магнитного поля (продольного), создаваемого соленоидом. Экспериментальное исследование проводилось на ртутном стенде кафедры Инженерной теплофизики МЭИ (рис. 1). Рабочий участок состоит из трех труб: входная труба диаметром (внутренним) 18 мм, далее переход на узкую трубу диаметром 5 мм, и выход на широкую трубу диаметром 25 мм, которая заканчивается камерой смешения с выходным патрубком.

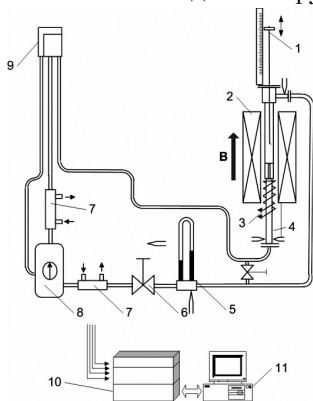


Рис. 1. Схема экспериментального стенда МЭИ: 1 – зонд; 2 – соленоид; 3 – нагреватель; 4 – рабочий участок; 5 – дифманометр расходомер; 6 – запорно-регулирующий вентиль; 7 – холодильники; 8 – резервуар со ртутью и насос; 9 – бак постоянного уровня; 10 – приборная стойка ИВК АСНИ; 11 – персональный компьютер

* М.А. Соколов, maximsocolov1997@mail.ru

В пересчете на трубу диаметром 18 мм стенд обеспечивает безразмерные параметры по числам Рейнольдса Re – до 55000, Пекле Pe – до 1200; Грасгофа Gr_q – до $1,0 \cdot 10^8$, Гартмана Ha – $0 \div 460$.

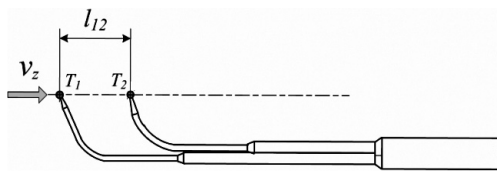


Рис. 2. Корреляционный датчик скорости

На первой трубе диаметром 18 мм смонтирован ленточный нагреватель необходимый для создания тепловых неоднородностей в потоке для обеспечения работоспособности корреляционного микротермопарного датчика скорости (рис. 2). Профили продольной скорости $V_z(r, z)$ измеряются корреляционным методом с использованием естественного фона турбулентных флуктуаций температуры, переносимых потоком. Термодатчик продольных корреляций имеет фиксированное расстояние между термопарами l_{12} .

Получены предварительные результаты по полю продольной компоненты скорости. По длине струя расширяется и скорость падает. Влияние продольного магнитного поля значительно. В ПМП струя более устойчива: размывание струи (расширение) затягивается по длине канала.

Список литературы

1. Генин Л.Г., Листратов Я.И., Свиридов В.Г., Жилин В.Г., Ивочкин Ю.П., Разуванов Н.Г. Экспериментальные исследования гидродинамики и теплообмена жидких металлов в магнитных полях // Вопросы атомной науки и техники. Серия: термоядерный синтез. Вып. 4. М., 2003. С. 35 – 44.

2. Sviridov V.G., Razuvanov N.G., Ivochkin Yu.P., Listratov Ya.I., Sviridov E.V., Genin L.G., Zhilin V.G., Belyaev I.A. Liquid Metal Heat Transfer Investigations Applied to Tokamak Reactor/ Proceeding of the International Heat Transfer Conference IHTC14, August 8-13, 2010. Washington, DC, USA. P. 1 – 8.

M.A. Sokolov¹, N.G. Razuvanovov^{1,2}

¹Joint Institute for High Temperatures of RAS
Russia, 125412, Moscow, Izhorskaya, 13

²National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
Russia, 111250 Moscow, Krasnokazarmennaya, 14

INVESTIGATION OF THE HYDRODYNAMICS OF A SUBMERGED JET OF LIQUID METAL IN A LONGITUDINAL MAGNETIC FIELD

*М.А. Засимова*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29 ***ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ВИХРЕВОГО ОБЛАКА,
СФОРМИРОВАННОГО ИМПУЛЬСНОЙ
ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУЕЙ**

Представляются данные численного моделирования течения и теплообмена для задачи об однократной импульсной подаче воздушной среды в окружающее безграничное пространство. Выдув импульсной струи осуществляется через круглое отверстие диаметром $d = 0,02$ м (рис. 1, *a*), воздушная среда проходит через трубку длиной $2d$ и попадает в обширное цилиндрическое пространство. Задача рассмотрена в осесимметричной (2D) и трехмерной (3D) постановках. Скорость подачи струи, V_0 , варьируется, при этом максимальное значение скорости достигает 20 м/с, что соответствует числу Рейнольдса $Re = 2,5 \times 10^3$, время выдува струи, T_0 , варьируется в диапазоне 0,05...0,4 секунды. Рассматриваются варианты, в которых объем вытекающего воздуха поддерживался равным 0,3 л. Для выбранных начальных условий задачи величина режимного параметра $P = (V_0 T_0 / d)^{1/3}$ постоянна и равна 3,6, что, в соответствии с [1], свидетельствует о формировании в пространстве вихревого облака. Задача решалась в изотермической и неизоатермической постановках, в этом случае температура окружающей среды равна 15 °С, а температура импульсной струи – 34 °С. Следует отметить, что рассматриваемые режимы течения соответствуют возникающим при острых респираторных явлениях, таких как кашель или чихание.

Численное моделирование осуществлялось на основе двух подходов: 2D или 3D URANS, в котором осуществляется решение осредненных по времени уравнений Навье-Стокса (использована модель турбулентности k - ϵ RNG), и LES (только для 3D расчетов), в котором решаются отфильтрованные по пространству уравнения Навье-Стокса. Выполнены расчеты с учетом и без учета эффекта плавучести. Расчеты проведены в пакете ANSYS Fluent. Использовались сгущающиеся ко входу сетки с гексагональными элементами для URANS расчетов (для 2D – 8,3 тыс., 3D – 600 тыс. ячеек) и сетка с одинаковыми полиэдральными ячейками для LES расчетов (35 млн ячеек). 3D расчеты проводились с использованием ресурсов СКЦ «Политехнический».

Эволюцию течения, формируемого импульсной подачей струи, можно разделить на три этапа: начальный этап (при $t < T_0$), на котором происходит

* М.А. Засимова, zasimova_ma@spbstu.ru

истечение струи, переходный этап (при $t < 1$ с), на котором происходит формирование вихревого облака, и основной этап, в котором движение вихревого облака осуществляется вплоть до его остановки. В работе детально изучается движение вихревого облака на основном этапе. В результате серии осесимметричных расчетов показано, что ядро вихревого облака на основном участке имеет квазисферическую форму (рис. 1, б). Получено подобие (автоподобность) безразмерных полей продольной скорости во времени. Показано, что уменьшение скорости во времени происходит по закону $t^{0.75}$. Фронт облака, положение максимума скорости и эквивалентный радиус вихревого облака увеличиваются со временем как $t^{0.25}$. Эти оценки согласуются с экспериментальными данными и теоретическими зависимостями [1].

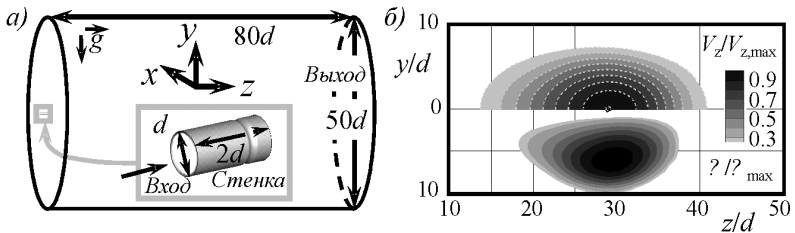


Рис. 1. а – схема расчетной области (3D); б – поля продольной скорости и модуля завихренности, полученные в осесимметричной постановке при $t = 10$ с

Данные 3D URANS расчетов и пространственно осредненные данные LES расчетов показывают, что вклад сил плавучести приводит к вертикальному подъему теплого вихревого облака. Форма вихревого облака практически не изменяется – как и ранее можно выделить квазисферическое ядро. Рассчитанные характеристики вихревого облака соответствуют полученным ранее экспоненциальным зависимостям. Показано, что уменьшение температуры со временем в вихревом облаке также осуществляется по закону $t^{0.75}$.

Список литературы

1. Sangras R., Kwon O.C., Faeth G.M. Self-preserving properties of unsteady round nonbuoyant turbulent starting jets and puffs in still fluids // ASME. J. Heat Transfer. 2002. V. 124. № 3. P. 460 – 469.

М.А. Засимова

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University,
Russia, 195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya, 29

INVESTIGATION OF THE VORTEX PUFF MOTION FORMED BY A PULSE TURBULENT JET

Е.Д. Степашева, М.А. Засимова, Н.Г. Иванов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29 *

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧИСЛА ПРИТОЧНЫХ СТРУЙ НА РАЗВИТИЕ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОГО РЕЖИМА ТЕЧЕНИЯ В ВЕНТИЛИРУЕМОМ ПОМЕЩЕНИИ

В докладе представляются результаты численного моделирования распространения одной или двух воздушных струй в ограниченном пространстве – полости, одна из границ которой открыта. На рис. 1, *a* показана область течения. Высота и ширина полости составляют $H = 20$ см, длина равна $L = 50$ см. Подача воздуха осуществляется через приточное сопло высотой $h_0 = 1$ см, размещенное со стороны открытой границы полости. В постановке, соответствующей условиям эксперимента [1] (вариант № 1), ширина сопла совпадает с шириной полости, средняя скорость воздуха на срезе сопла составляет $V_{in} = 6$ м/с. В постановках №2, №3 и №4 воздух в полость поступает через два отверстия шириной $H/5$, расположенных на срезе приточного сопла (рис. 1, *a*). Скорость воздуха, V_{in} , для этих вариантов задавалась равной: 6 м/с для варианта №2, 9,5 м/с – № 3 и 15 м/с – № 4. Значения числа Рейнольдса при этом составляют от 4×10^3 до $1,2 \times 10^4$. Отметим, что в варианте № 3 поддерживается тот же импульс струи, что и в исходном варианте №1 $I = n\rho h_0 H V_{in}^2 = 0,086$ кг м/с² (n – количество струй). В вариантах №1 и №4 обеспечивается один и тот же расход струи, $Q = n\rho h_0 H V_{in} = 0,014$ кг/с.

Расчеты проводились в изотермической, соответствующей условиям [1], и неизотермической постановках. В неизотермической постановке стенки полости поддерживались при постоянной температуре $T_w = 30^\circ\text{C}$, температура приточной струи была задана равной $T_{in} = 20^\circ\text{C}$.

Моделирование турбулентности проводилось на основе вихререзающего метода моделирования крупных вихрей (LES подход), с использованием модифицированной подсеточной модели Смагоринского, и на основе решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (URANS), для замыкания которых использовалась $k-\omega$ SST модель турбулентности. Расчеты проводились в пакете ANSYS Fluent на СКЦ «Политехнический». Использовались сетки с гексагональными элементами: число ячеек расчетной сетки для LES расчетов – 20 млн, для URANS – 6 млн ячеек.

*Е.Д. Степашева, stepasheva.ed@gmail.com

Для варианта №1 с подачей одной струи было проведено сравнение результатов расчетов, полученных на основе URANS и LES подходов. В расчетах показано, что в соответствии с [1] получен нестационарный режим истечения плоской струи – в полости реализуются автоколебания струи. Частота и амплитуда колебаний, полученная в расчетах согласуется с полученной экспериментально частотой [1].

При подаче в полость двух смежных струй (варианты № 2 – № 4) автоколебания сохраняются: две струи как единое целое отклоняются поочередно к нижней и верхней стенкам полости. Эволюция скорости в точке, расположенной на расстоянии $12h_0$ от сопла, для рассмотренных вариантов показана на рис. 1, б. Частота колебаний в размерном виде различна: в варианте № 1 она равна $0,60 \text{ с}^{-1}$, в № 2 – $0,67 \text{ с}^{-1}$, в № 3 – $1,02 \text{ с}^{-1}$ и в № 4 – $1,58 \text{ с}^{-1}$. В безразмерном виде (масштабирование по характерным значениям V_{in} и h_0) значения частоты автоколебаний близки и приблизительно равны 10^3 .

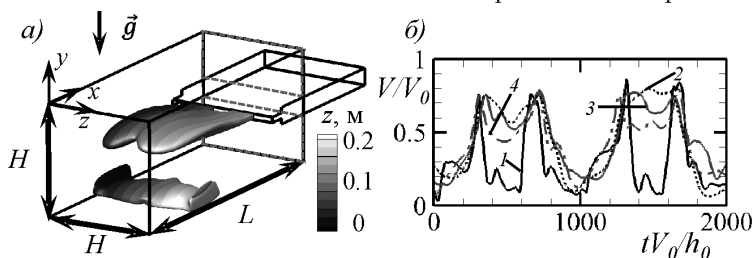


Рис. 1. а – изоповерхность мгновенной скорости, 4 м/с, для варианта №4; б – эволюция скорости, полученная для вариантов №1-4

Проведено исследование влияния количества приточных струй и скорости их подачи на параметры теплового комфорта. Показано, что одиночная струя обеспечивает более интенсивное перемешивание воздуха в полости, и, как следствие, более низкую температуру в ней.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФ № 22-29-00224.

Список литературы

1. **Mataoui A., Schiestel R., Salem A.** Flow regimes of interaction of a turbulent plane jet into a rectangular cavity: experimental approach and numerical modelling // Flow, Turbulence and Combustion. 2001. V. 67. P. 267 – 304.

E.D. Stepasheva, M.A. Zasimova, N.G. Ivanov

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University,
Russia, 195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya, 29

STUDY OF SUPPLY JETS NUMBER INFLUENCE ON THE DEVELOPMENT OF THE SELF-OSCILLATING AIR FLOW REGIME IN A VENTILATED ROOM

С.В. Киселева^{1,2}, И.О. Тепляков²

¹ НИУ «Московский энергетический институт»,
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14/1

² Объединенный институт высоких температур РАН,
111116, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 17А *

ПИНЧ-ЭФФЕКТ В ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ С ПОЛУСФЕРИЧЕСКИМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

В электрометаллургических установках предназначенных для плавки металла электродуговым или электрошлаковым методом, в результате взаимодействия электрического тока, проходящего через расплавленный металл, с собственным магнитным полем (МП) возникает электромагнитная сила приводящая к различным магнитогидродинамическим явлениям. В данной работе исследуется явление пинч-эффекта, заключающееся в деформации поверхности жидкого проводника под действием электромагнитной силы [1].

Схема экспериментальной установки представлена на врезке рис. 1. Полусферический электрод – 1 с радиусом R_1 погружается в жидкий металл – 2 (эвтектический сплав In-Ga-Sn) заполняющий проводящую полусферу радиусом $R_2 = 3$, через металл от малого электрода с потенциалом F_0 пропускается постоянный электрический ток I с плотностью \mathbf{J} , создающий магнитное поле \mathbf{B} . Возникающая полоидальная сила $\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}$ приводит металл в движение, вызывая электровихревое течение [2], а также заставляет металл отжиматься от электрода [3], вызывая т.н. «пинч-эффект». С увеличением тока, площадь контакта электрода с металлом уменьшается и по достижении некоторого критического значения тока зажигается разряд, ток падает, соответственно уменьшается электромагнитная сила, поверхность жидкого металла начинает возвращаться в свое исходное положение, далее процесс циклически повторяется приводя к колебаниям поверхности.

Была проведена серия экспериментов по определению критического тока для разных радиусов малого электрода. Результаты экспериментов представлены на рис. 1.

Также была создана расчетная методика, включающая в себя расчеты распределения электрического потенциала, плотности тока, магнитного поля, скорости жидкости в объеме и формы поверхности жидкого металла. Для расчета электрического потенциала и поля скорости использовался метод

* С.В. Киселева, sofiyakiselyova.work@gmail.com

контрольного объема. Для определения формы поверхности использовался метод Volume-of-Fluid. Магнитное поле рассчитывалось численно-аналитическим методом, интегрированием уравнения Максвелла.

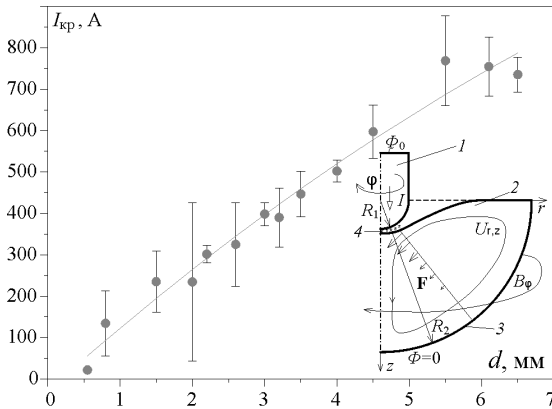


Рис. 1. Экспериментальная зависимость критического тока от радиуса малого электрода. (Врезка: схема экспериментальной установки)

Получены расчетные значения критических токов и частот колебаний поверхности. Расчетные данные удовлетворительно совпадают с экспериментальными.

Результаты исследования могут быть использованы для оптимизации работы электрометаллургических установок и сварочного оборудования.

Список литературы

1. Northrup E.F. Some newly observed manifestations of forces in the interior of an electric conductor. Phys. Rev. (Series I), 1907. 24. P. 474 – 497.
2. Бояревич В.В., Фрейнберг Я.Ж., Шиловах Е.И. и др. / под ред. Э.В. Шербина. Электровихревые течения. Рига: Зинатне. 1985. С. 315.
3. Kharicha A., Teplyakov I., Ivochkin Yu., Wu M., Ludwig A., Guseva A. Experimental and numerical analysis of free surface deformation in an electrically driven flow. Experimental Thermal and Fluid Science. 2015, 62. P. 192 – 201.

S.V. Kiselyova^{1,2}, I.O. Teplyakov²

¹ National Research University “Moscow Power Engineering Institute”,
Russia, 111250 Moscow, Krasnokazarmennaya, 14/1

² Joint Institute of High Temperature,
Russia, 111116 Moscow, Krasnokazarmennaya, 17A

PINCH EFFECT IN A LIQUID METAL SYSTEM WITH HEMISPHERICAL ELECTRODES

А.Д. Красикова, М.А. Засимова

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29 *

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОКОЛЕБАНИЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУИ, РАСПРОСТРАНЯЮЩЕЙСЯ В УЗКОЙ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПОЛОСТИ

Один из способов терморегуляции технических устройств – подача охлажденных вентиляционных струй на нагретые элементы. Эффективная производительность такого способа существенно зависит от структуры формируемого вентиляционного течения. В настоящей работе исследуется возможность управления течением основной струи путем впрыска регулирующей низкорасходной струи. Постановка задачи соответствует условиям эксперимента [1].

Получены данные численного моделирования турбулентного течения воды, формирующегося в узкой прямоугольной полости (рис. 1, *a*) с размерами $4 \times 58,5 \times 25$ см³. Основная струя подается в полость через круглое отверстие диаметром $d = 1,4$ см со средней скоростью 3,75 м/с, что соответствует числу Рейнольдса $Re = 5,4 \times 10^4$. Противоположная от входа основной струи граница полости открыта (на рис. 1, *a* обозначена как «Выход»). На этой границе задано мягкое выходное граничное условие постоянства давления. На одной из узких вытянутых стенок полости, параллельных оси основной струи, расположено отверстие диаметром 0,6 см для подачи регулирующей струи. Скорость подачи воды варьируется в диапазоне 0...6,8 м/с, при этом максимальное число Рейнольдса регулирующей струи составило $4,2 \times 10^4$. Отношение расходов регулирующей и основной струи, α , изменяется от 0 до 0,23, отношение количеств движения, β , изменяется от 0 до 0,4.

Моделирование турбулентного движения осуществлялось на основе двух подходов: URANS (с k - ϵ RNG моделью) и LES (с моделью Смагоринского). Расчеты выполнены в пакете ANSYS Fluent. Использовались сетки, построенные в ICEM CFD, общая размерность сеток составила 0,6 млн ячеек для URANS расчетов и 5 млн ячеек для LES. Расчеты выполнены с использованием ресурсов СКЦ «Политехнический».

В отсутствие регулирующей струи ($\alpha = \beta = 0$) в расчетах получен автоколебательный режим распространения основной струи. Эволюция скорости в точке мониторинга, расположенной на расстоянии $2d$ от входного отверстия, показана на рис. 1, *б*. Полученные в расчетах данные по амплиту-

*А.Д. Красикова, krasikovaanya161299@gmail.com

де и периоду колебаний основной струи находятся в согласии с экспериментальными данными [1]. Так, по данным расчетов период колебаний составил 5.7 с по методу URANS и 5.5 с по методу LES, последнее значение совпадает с результатом эксперимента [1].

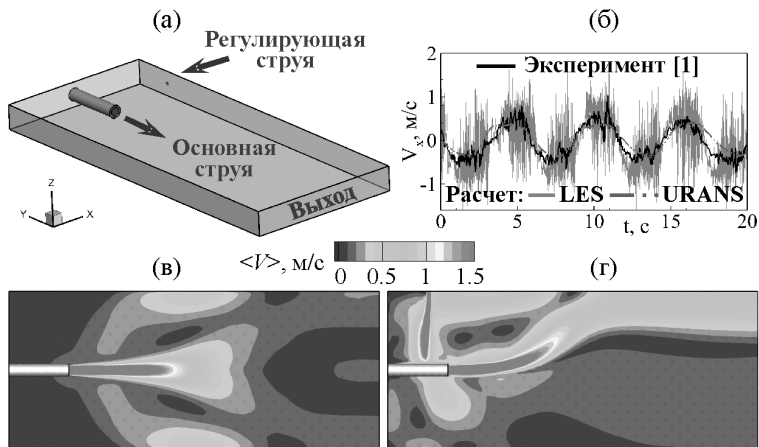


Рис. 1. *а* – расчетная область; *б* – эволюция скорости в точке мониторинга при $\beta = 0$; средние поля модуля скорости при $\beta = 0$ и $\beta = 0,4$ (данные URANS)

При подаче боковой регулирующей струи в область распространения основной струи структура течения перестраивается (рис. 1, *в*, *г*). При значениях скорости боковой струи, не превышающих 3 м/с, частота автоколебаний значительно снижается. При больших значениях скорости, реализуется квазистационарный режим течения – основная струя прилипает к границе полости со стороны которой подается регулирующая струя (рис. 1, *г*). Получено, что положение точки прилипания струи меняется слабо при дальнейшем увеличении скорости регулирующей струи.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФ № 22-29-00224.

Список литературы

1. Lawson N.J., Arruda M.P., Davidson M.R. Control of a submerged jet in a thin rectangular cavity // Journal of Fluids and Structures. 2005. V. 20. P. 1025 – 1042.

A.D. Krasikova, M.A. Zasimova

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University,
Russia, 195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya, 29

NUMERICAL STUDY OF TURBULENT JET OSCILLATIONS FORMED IN A THIN RECTANGULAR CAVITY

А.Д. Подмаркова, М.А. Засимова, Н.Г. Иванов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, 195251, Политехническая, 29 *

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ И ПОЛОЖЕНИЯ ТЕПЛООВОГО МАНЕКЕНА В ТЕСТОВОМ ВЕНТИЛИРУЕМОМ ПОМЕЩЕНИИ НА СТРУКТУРУ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООТДАЧУ

Представляются результаты численного моделирования течения в вентилируемом помещении (рис. 1, *а*), внутри которого расположен тепловой манекен. Геометрические размеры помещения: длина $L = 2,44$ м, высота $H = 2,46$ м и ширина $W = 1,2$ м. Воздух поступает в помещение через открытую торцевую границу, на противоположной стенке расположены два круглых выходных отверстия диаметром $d = 0,25$ м. Рассмотрены две формы манекена: детализированная и упрощенная (рис. 1, *б*). Размер манекенов вдоль вертикальной оси равен 1,4 м, площадь поверхности манекенов равна 1,6 и 1,8 м² соответственно. Положение манекена в помещении варьировалось.

Значения входной скорости V_{in} были выбраны из диапазона 0,01...0,3 м/с. Отметим, что постановка задачи соответствует [1], при $V_{in} = 0,27$ м/с и использовании детализированной формы манекена, расположенной в центре помещения (рис. 1, *а*). Температура поступающего в помещение воздуха равна $T_{in} = 20,4^{\circ}\text{C}$. Поверхность манекена поддерживалась при постоянной температуре, $T_m = 34^{\circ}\text{C}$. Число Грасгофа, построенное по высоте манекена, составило $Gr = 5,1 \cdot 10^9$. Стенки помещения полагаются теплоизолированными.

Моделирование выполнено с использованием пакета ANSYS Fluent на сетках от 1 до 7 млн ячеек. Для моделирования турбулентности использовались два подхода: RANS (со стандартной $k-\epsilon$ моделью) и LES (с подсеточной моделью Смагоринского). Показано, что осредненные во времени данные скорости и температуры, полученные в расчетах по методам LES и RANS, схожи. Эффекты плавучести учитывались в приближении Буссинеска. Расчеты проводились с использованием ресурсов СКЦ «Политехнический».

В зависимости от значения V_{in} в помещении реализуется или перемешивающий режим течения с преобладанием вынужденной конвекции (при $V_{in} > 0,2$ м/с), или естественноконвективный режим (при $V_{in} < 0,1$ м/с), см. рис. 1, *в*. В случае перемешивающего режима влияние формы манекена проявляется преимущественно в отрывной зоне (это видно, например, на рис. 1, *г*, где показано сопоставление данных для сечения, расположенного за манекене-

* А.Д. Подмаркова, ann.podmarkova@mail.ru

ном). В случае свободноконвективного режима течения над поверхностью манекена формируется тепловой факел, со значениями скорости до 30 см/с, на структуру которого форма манекена также оказывает определенное влияние (см. профили в сечении над головой на рис. рис. 1, з). Влияние формы манекена на вторичное течение, инициированное факелом, слабое.

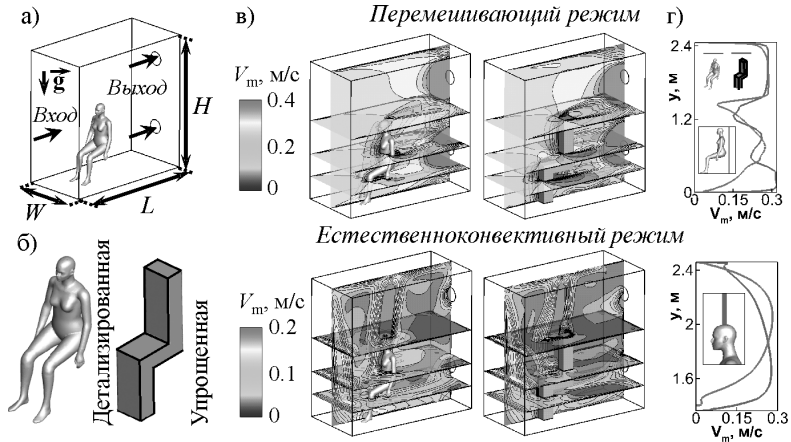


Рис. 1. *а* – расчетная область; *б* – вид манекенов; средние (*в*) поля и (*з*) профили скорости при $V_{in} = 0,27 \text{ м/с}$ (верхний ряд) и $V_{in} = 0,01 \text{ м/с}$ (нижний ряд)

Обсуждается зависимость среднего теплового потока, q_w , от формы манекена, его расположения и ориентации в помещении и режима течения. Так, для условий, показанных на рис. 1, при переходе от детализированной к упрощенной форме в случае перемешивающего режима течения q_w уменьшается на 30 %, а при преобладании свободной конвекции – на 10%.

Исследование поддержано грантом Президента РФ МК-1762.2022.1.1.

Список литературы

1. Nilsson H.O., Brohus H., Nielsen P.V. Benchmark test for a computer simulated person – manikin heat loss for thermal comfort evaluation / Aalborg university. 2007. 7 p.

A.D. Podmarkova, M.A. Zasimova, N.G. Ivanov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Russia 195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya, 29

INFLUENCE OF THE THERMAL MANIKIN SHAPE AND POSITION IN THE TEST VENTILATED ROOM ON THE FLOW STRUCTURE AND HEAT TRANSFER

Н.Д. Богданов^{1,2}, И.А. Давлетшин²

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им.

А.Н. Туполева - КАИ, 420111, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 10

² Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН»,
420111, г. Казань, ул. Лобачевского д. 2/31

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧЛЕНОВ УРАВНЕНИЯ БАЛАНСА КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Определение членов уравнения баланса кинетической энергии турбулентности (КЭТ) важно для понимания структуры потока, которая представляет интерес как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения.

Уравнение баланса энергии турбулентности:

$$\frac{\partial k}{\partial t} = P + C + T + \varepsilon,$$

где k – КЭТ, отнесенная к единице массы; P – скорость генерации КЭТ; C – конвекция; T – турбулентная диффузия; ε – скорость диссипации КЭТ. Левая часть на стационарном режиме равна 0.

При экспериментальном определении слагаемых в правой части возникают следующие проблемы. Для определения диссипации необходимо высокое пространственное разрешение, а также измерение трехмерного поля скоростей. В турбулентную диффузию входят пульсации давления, которые не могут быть измерены в настоящее время.

Согласно [1], основные подходы к определению диссипации – это вычисление на основе прямого измерения всех компонент скорости, вычисление с помощью двумерного поля скоростей с использованием гипотез о характере турбулентности (гипотезы локально изотропной турбулентности, локально осесимметричной турбулентности и др.), а также нахождение диссипации как недостающего слагаемого в уравнении.

Для нахождения турбулентной диффузии, связанной с давлением, согласно [1,2], применяются следующие подходы: нахождение слагаемого, содержащего пульсации давления, как замыкающего; пренебрежение пульсациями давления; использование модельных соотношений; вычисление поля давлений на основе поля скоростей.

Были проведены исследования течения в плоском диффузоре с углом раскрытия $\varphi = 2,5^\circ$, длиной $L = 1820$ мм, шириной $B = 150$ мм и высотой входного сечения $H_0 = 28$ мм. Рабочее вещество – воздух, $Re_0 = U_0 H_0 / \nu = 10^4$,

где U_0 – скорость на входе. Метод исследования – планарный метод SIV. Были определены слагаемые уравнения баланса КЭТ с использованием допущения о двумерности. Диссипация определялась с помощью гипотезы осесимметричной турбулентности. При определении турбулентной диффузии было принято решение пренебречь пульсациями давления.

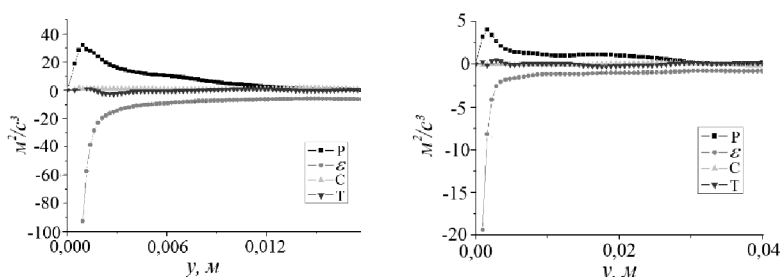


Рисунок. Профили членов уравнения баланса КЭТ в диффузоре:
 а – для сечения на расстоянии $x = 150$ мм от входа;
 б – для сечения на расстоянии $x = 800$ мм от входа

Были получены профили членов баланса КЭТ для градиентного течения в диффузоре. На рисунке показаны графики для двух сечений диффузора:

Из графиков видно, что величины генерации и диссипации существенно превышают величины конвекции и турбулентной диффузии. При этом все слагаемые имеют максимум вблизи пристеночной области.

Можно сделать вывод, что основные слагаемые баланса – это генерация и диссипация. Также следует отметить, что абсолютные значения слагаемых уменьшаются с ростом расстояния от входа.

Список литературы

1. **Xiaofeng Liu, Flint O. Thomas.** Measurement of the turbulent kinetic energy budget of a planar wake flow in pressure gradients // *Experiments in Fluids* 37, 2004. P. 469 – 482.

2. **Chris C.K. Lai, Scott A. Socolofsky.** Budgets of turbulent kinetic energy, Reynolds stresses, and dissipation in a turbulent round jet discharged into a stagnant ambient // *Environmental Fluid Mechanics*, 2018.

N.D. Bogdanov^{1,2}, I.A. Davoletshin²

¹ Kazan National Research Technical University Named after A.N.Tupolev – KAI, 10 Karl Marx St.

² Federal Research Center «Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences», Box 261, Kazan, 420111

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF TURBULENCE KINETIC ENERGY BUDGET EQUATION TERMS

А.А. Лукьянов^{1,2}, М.Ю. Ничик¹, С.А. Пантелеев^{1,2}, Д.И. Зарипов^{1,3}

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

² Новосибирский государственный университет,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, д. 1*

³ Институт энергетики и перспективных технологий КазНЦ РАН,
420111, г. Казань, ул. Лобачевского д. 2/31

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕСТАБИЛИЗАЦИИ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ С ПОМОЩЬЮ 3D УСТРОЙСТВ

Снижение влияния силы трения, возникающей при транспортировке текучих сред, является важнейшей задачей, встречающейся во многих отраслях человеческой деятельности. На преодоление этих сил тратятся огромные ресурсы, поэтому даже их минимальное снижение позволило бы существенно снизить затраты на прокачку. Недавно в работе [1] было предложено использование специального устройства-реламинаризатора, представляющего систему направленных по потоку сот, с помощью которого удалось разрушить исходно развитое турбулентное течение и снизить тем самым гидравлическое сопротивление до уровня ламинарного течения. Согласно работе [2], принцип работы этого устройства заключается в создании ударного профиля средней скорости на его выходе, что является одним из условий реламинаризации турбулентного течения в цилиндрических каналах. Однако вопрос об эффективности использования данных устройств с точки зрения снижения местного гидравлического сопротивления, все еще остается открытым.

В данной работе было рассмотрено развитое турбулентное течение воды в оптически прозрачном цилиндрическом канале длиной 5 м в диапазоне чисел Рейнольдса $2000 < Re < 5000$, где $Re = U_b D / \nu$; U_b – среднерасходная скорость; D – диаметр канала; ν – коэффициент кинематической вязкости. Для того чтобы убедиться в подобии исследуемых процессов, было рассмотрено два различных канала с диаметрами 0,016 и 0,032 м. Предварительные эксперименты показали, что течение в рабочем участке было симметричным относительно оси канала в рассматриваемом диапазоне чисел Рейнольдса.

* А.А. Лукьянов, a.lukyanov@g.nsu.ru

При исследовании механизма реламинаризации рассматривалось несколько конфигураций устройств, характеризующихся различной степенью местного гидравлического сопротивления. Все устройства были установлены на расстоянии $70D$ от входа в рабочий участок ниже по потоку, где течение было развитым, в смысле автомодельности профиля скорости и турбулентных пульсаций вдоль рабочего участка. Измерения были выполнены поперек канала на расстояниях $6D$ и $120D$ за этими устройствами с использованием высокоскоростного многопроходного метода Particle Image Velocimetry [3] с высоким пространственно-временным разрешением. Результаты измерений профилей скорости и турбулентных пульсаций показали возможность полной реламинаризации исходно развитого турбулентного течения в цилиндрическом канале. Были получены параболические профили скорости на расстоянии $120D$ вниз по потоку от устройства-реламинаризатора, обладающего большей, чем в работе [1], гидравлической эффективностью, вплоть до числа Рейнольдса $Re = 3810$. Предварительные экспериментальные данные показали, что механизм реламинаризации связан с формированием М-образного профиля продольной скорости за рассматриваемым устройством.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01274, <https://rscf.ru/project/22-29-01274/>

Список литературы

- 1. Kuhnen J., Scarselli D., Hof B.** Relaminarization of pipe flow by means of 3d-printed shaped honeycombs // Journal of Fluids Engineering. 2019. Т. 141. №11.
- 2. Kuhnen J. et al.** Destabilizing turbulence in pipe flow // Nature Physics. 2018. Т. 14. №4. С. 386 – 390.
- 3. Ахметбеков Е.К. и др.** Система управления экспериментом и обработки данных, полученных методами цифровой трассерной визуализации (ActualFlow) // Вычислительные методы и программирование. 2006. Т. 7. №2. С. 79 – 85.

A.A. Lukyanov ^{1,2}, M.Yu. Nichik ¹, S.A. Pantelev ^{1,2}, D.I. Zarirov ^{1,3}

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics,
Russia 630090 Novosibirsk, Acad. Lavrentiev ave., 1

² Novosibirsk State University,
Russia 630090 Novosibirsk, Pirogova, 1

³ Institute of Power Engineering and Advanced Technologies Kazan Scientific center
Russian Academy of Sciences
Russia 420111 Kazan, Lobachevskogo, 2/31

EXPERIMENTAL STUDY OF TURBULENT FLOW DESTABILIZATION IN A PIPE USING 3D DEVICES

Л.Р. Шайдуллин¹, С.А. Фадеев^{2,3}

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, 420111, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 10

² Институт механики и машиностроения ФИЦ Казанский научный центр РАН, 420111, г. Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31*

³ Казанский федеральный университет, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18

РЕЗОНАНСНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ГАЗА В ЗАКРЫТОЙ ТРУБЕ С НЕОДНОРОДНЫМ РАДИАЛЬНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ

Интерес к исследованию резонансных колебаний сплошной среды при наличии неоднородного температурного поля обусловлен их широким распространением в самых разных областях науки и техники: термоакустика [1-3], вибрационное горение [4, 5], акустические волны в газоразрядной плазме [6-8] и др. Таким образом, изучение резонансных колебаний газа в средах с неоднородным пространственным распределением температуры является актуальной задачей, имеющей важное практическое значение. В настоящей работе рассмотрены колебания газа в трубе с параболическим распределением температуры по радиусу.

Резонансные колебания газа в трубе описывались линеаризованной системой уравнений Навье-Стокса, включающей уравнения сохранения импульса, массы, энергии и уравнение Клапейрона-Менделеева. Гармонические колебания возбуждаются с помощью плоского поршня, находящегося на одном из концов трубы, другой конец закрыт. Для получения неоднородно температурного поля решалось стационарное уравнение энергии с источником тепла Q . Система уравнений решается численно, методом конечных элементов. Уравнения модели и граничные условия представлены в [9].

В результате расчета были получены амплитудно-частотные характеристики колебаний давления газа на закрытом конце. В отсутствие источника тепла ($Q = 0$) резонансная частота составляет $f = 182,5$ Гц. Показано, что с увеличением Q наблюдается дисперсия резонансной частоты, то есть сдвиг в сторону повышения. Это характерно для случая нагрева газа, так как резонансная частота пропорциональна скорости звука $f_r \sim c_0$ и, в соответствии с уравнением состояния идеального газа, корню температуры [10]. Так же

* С.А. Фадеев, fadeev.sergei@mail.ru

наблюдается рост амплитуды колебаний давления газа при повышении температуры на оси и, в соответствии с изотермическими граничными условиями на стенке, увеличение радиального перепада температур.

При распространении колебаний газа в трубе с неоднородным радиальным распределением температуры, профиль стоячей волны скорости газа зависит от профиля температуры [7]. В связи с искривлением фазовых плоскостей, скорость продольных колебаний газа приобретает поперечную компоненту [9], поэтому в ядре потока наблюдается параболический радиальный профиль амплитуды колебаний осевой компоненты скорости газа.

Список литературы

1. Thermoacoustics: A Unifying Perspective for Some Engines and Refrigerators / G.W. Swift. New York: Springer, 2017. 326 p.
2. **Rott N.** Thermoacoustics // *Advances Appl. Mech.* 1980. V. 20. P. 135 — 175.
3. **Merkli P., Thomann H.** Thermoacoustic effects in a resonance tube // *J. Fluid Mech.* 1975. V. 70. No 1. P. 161 — 175.
4. Вибрационное горение / Б.В. Раушенбах. М.: Изд-во физ.-мат. лит., 1961. 250 с.
5. Неустойчивость горения / М.С. Натанзон. М.: Машиностроение, 1986. 248 с.
6. **Арамян А.Р., Галечян Г.А.** Вихри в газоразрядной плазме // *УФН.* 2007. Т. 177. № 11. С. 1207 — 1230.
7. **Завершинский И.П., Коган Е.Я.** Структуры газового разряда в акустическом поле // *Физика плазмы.* 1996. Т. 22. № 3. С. 281 — 288.
8. **Lizunov G.P., Shimanovich V.D., Burov I.S.** Intensified plasma deposition with acoustic and electrical oscillations applied to the heterogeneous jet // *Journal of Engineering Physics.* 1984. V. 47. P. 1342 — 1345.
9. **Gubaidullin D.A., Tkachenko L.A., Fadeev S.A., Shaidullin L.R.** Resonant oscillations of a gas in a closed tube in the presence of an inhomogeneous temperature field // *Lobachevskii Journal of Mathematics.* 2022. V. 43. No 5. P. 1110 — 1115.
10. Гидродинамика. Теоретическая физика: Т. VI. / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. М.: Наука, 1986. 736 с.

A.I. Shaidullin¹, S.A. Fadeev^{2,3}

¹ Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI, Russia 420111 Kazan, Karl Marx, 10

² Institute of Mechanics and Engineering, FRC Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Russia, 420111 Kazan, Lobachevskogo, 2/31

³ Kazan Federal University, Russia, 420008 Kazan, Kremlevskaya, 18

RESONANT GAS OSCILLATIONS IN A CLOSED TUBE WITH INHOMOGENEOUS RADIAL TEMPERATURE DISTRIBUTION

СЕКЦИЯ 2

ТЕПЛО-И МАССООБМЕН В ДВУХФАЗНЫХ И МНОГОФАЗНЫХ ПОТОКАХ

Н.В. Васильев^{1,2}, С.Н. Вавилов¹, Ю.А. Зейгарник¹, Е.А. Лиджиев^{1,2}

¹ Объединенный институт высоких температур РАН,
125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2*

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5

ИССЛЕДОВАНИЕ САМОПРОИЗВОЛЬНОГО ТРИГГЕРИНГА ПАРОВОГО ВЗРЫВА НА РАСПЛАВЛЕННЫХ КАПЛЯХ СОЛИ И ОЛОВА

Работа посвящена экспериментальному исследованию самопроизвольного парового взрыва на расплавленных каплях соли (NaCl) и передачи триггеринга процесса на соседние капли соли и олова.

Исследование проводилось на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис. 1, подробно описанной в [1]. Расплавление соли и олова (массой 1 – 2,5 грамма) производилось с помощью высокочастотного

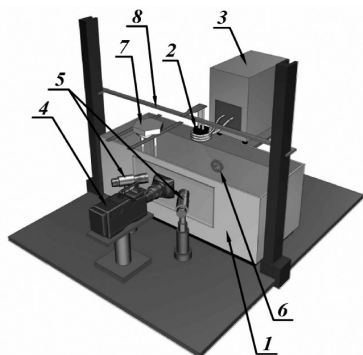


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – емкость с водой (530 x 250 x 230 мм); 2 – графитовый тигель–генератор капель; 3 – ВЧ-индуктор; 4 – высокоскоростная видеокамера; 5 – фонари подсветки; 6 – датчик давления; 7 – электронагреватель воды; 8 – механизм подъема графитовых стержней

индуктора в специальном двуполостном графитовом тигле. Затем капли расплавов попадали в емкость с дистиллированной водой, после чего осуществлялась высокоскоростная видеосъемка (до 180 кГц) процесса. Эксперименты проводились при температуре капель расплавов 850 – 1100°C и температуре воды $t_b = 20 - 60$ °С.

В данном диапазоне температур самопроизвольный триггеринг парового взрыва на каплях расплава NaCl реализовывался практически со 100 % вероятностью. На рис. 2 представлены кадры видео распространения триггеринга между каплями NaCl. Как видно на кадре рис. 2, *а*, после попадания расплава в воду сформировались пять отдельных капель. Промежуток времени между падением первой и последней капель составил примерно 100 мс. На рис. 2, *а*

* Н.В. Васильев, nikvikvas@mail.ru

изображен момент парового взрыва на первой (верхней) капле NaCl. На кадре рис. 2, б показан момент передачи взрыва на близлежащие вторую и третью капли. Следующие два кадра иллюстрируют моменты передачи взрыва на четвертую (рис. 2, в) и пятую (рис. 2, г) капли соответственно.

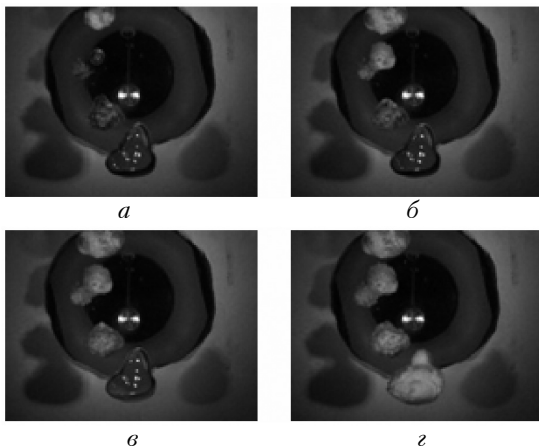


Рис. 2. Распространение триггеринга парового взрыва между каплями NaCl ($t_b = 23^\circ\text{C}$, $t_{\text{NaCl}} = 1150^\circ\text{C}$ в тигле).
 Время экспозиции – 10 мкс. Размер кадров 53,5 x 43,5 мм. Время от кадра а – парового взрыва на верхней капле: б – 99 мкс; в – 132 мкс; г – 165 мкс. На заднем фоне виден датчик давления с элементом крепления на стенке (см. поз. 6 на рис. 1)

На каплях олова самопроизвольный триггеринг происходил крайне эпизодически, бессистемно. В работе экспериментально продемонстрирована передача триггеринга парового взрыва от капли NaCl на соседние капли олова. Данный метод является более близким к реальным условиям, чем зачастую используемый во многих исследованиях внешний искусственный триггеринг процесса.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Госзадание № 075-01129-23-00).

Список литературы

1. Спонтанный триггеринг парового взрыва: результаты экспериментальных исследований / С.Н. Вавилов, Н.В. Васильев, Ю.А. Зейгарник, А.В. Клименко, Д.А. Скибин // Теплоэнергетика. 2022. № 7. С. 15 – 22.

N. V. Vasil'ev^{1,2}, *S. N. Vavilov*¹, *Yu. A. Zeigarnik*¹, *E. A. Lidzhiev*^{1,2}

¹ Joint Institute for High Temperature RAS,
 Russia, 125412 Moscow, Izhorskaya, 13/2

² Bauman Moscow State Technical University
 Russia, 105005, Moscow, 2-nd Baumanskaya, 5

STUDYING OF SPONTANEOUS VAPOR EXPLOSION TRIGGERING ON MOLTED SALT AND TIN DROPS

*П.А. Стрижак, П.П. Ткаченко, А.Г. Исламова, Н.Е. Шлегель,
С.С. Кроптова*

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

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ВТОРИЧНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТЕЙ В ГАЗОВЫХ СРЕДАХ РАЗНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Одной из основных задач анализа газопарокапельных потоков (например, в приложениях [1 – 3]) является контроль компонентного состава, концентрации капель, частиц, пузырьков, паров и других компонентов при различных условиях теплообмена. Одной из основных проблем при создании газопарокапельных потоков (особенно высокотемпературных) на основе дымовых газов, пара и капель воды, а также других жидкостей, эмульсий и суспензий является сложно контролируемый унос капель газами [4]. Актуальна задача создания прогностического математического аппарата для установления предельных условий и характеристик такого уноса в большой группе приложений: полидисперсное тушение пожаров с применением тонкораспыленной воды; термическая или огневая очистка жидкостей в потоке продуктов сгорания или высокотемпературного воздуха; создание теплоносителей на базе дымовых газов, паров и капель воды; размораживание сыпучих сред и обработка зашлакованных поверхностей теплонагруженного энергетического оборудования; зажигание капель жидких и суспензионных топлив.

В рамках цикла научных работ разработаны экспериментальные методики регистрации основных характеристик процессов взаимодействия капель жидкостей в газовых средах, а также капель жидкостей с твердыми частицами. Для обобщения результатов исследований рассчитывались значения безразмерного линейного параметра взаимодействия B , чисел Вебера We , Онезоре Oh и капиллярности Ca . Строились режимные карты в системе координат $B(We)$, $We(Oh)$ и $We(Ca)$. Изучались характеристики вторичных капель, формирующихся при дроблении исходной. Для этого регистрировались радиусы всех видимых (т.е. в области видеорегистрации) вторичных фрагментов и их количество. Получены математические выражения для описания режимов взаимодействия капель жидкостей и твердых частиц.

Установлено влияние формы, размеров, траекторий и скоростей движения, углов атаки капель жидкостей на режимы взаимодействия, количество и размеры вторичных фрагментов. Данные параметры варьировались в широ-

ких диапазонах, соответствующих перспективным газопарокапельным технологиям: радиус (0,1 – 3 мм); скорость движения (0,01 – 5 м/с); движение (вращательное, ускоренное, поступательное); углы столкновения (0-90). Показано, что в случае соударений капель в составе аэрозоля имеет место большое рассеяние экспериментальных данных. Наиболее существенное влияние оказывали относительные размеры и скорости движения капель, а также безразмерные параметры взаимодействия (угловой и линейный).

Установлено влияние свойств жидкости (вязкость, поверхностное и межфазное натяжение, плотность) и твердых частиц (смачиваемость, шероховатость) на карты режимов взаимодействия, количество и размеры вторичных фрагментов. Диапазоны варьирования ключевых свойств: динамическая вязкость 0,0014 – 0,0063 Па с; поверхностное натяжение 0,0275 – 0,07269 Н/м; межфазное натяжение 0,00341 – 0,04257 Н/м. Диапазоны изменения безразмерных параметров: число Вебера 0 – 200, Онезорге 0 – 0,03.

Результаты исследований представляют интерес для развития газопарокапельных технологий.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект 18-71-10002-П, <https://rscf.ru/en/project/21-71-03001/>).

Список литературы

1. **Del Pino C., Parras L., Felli M.** Fernandez-Feria R. Structure of trailing vortices: Comparison between particle image velocimetry measurements and theoretical models // *Physics of Fluids*. 2011. V. 23. Article ID 013602.
2. **Corvaro F., Paroncini M., Sotte M.** Experimental PIV and interferometric analysis of natural convection in a square enclosure with partially active hot and cold walls // *International Journal of Thermal Science*. 2011. V. 50, No 9. P. 1629 – 1638.
3. **Young C.N., Johnson D.A., Weckman E.J.** A Model-Based Validation Framework for PIV and PTV // *Experiments in Fluids*. 2004. V. 36, No 1. P. 23 – 35.
4. **Strizhak P.A., Volkov R.S.** The integral characteristics of the deceleration and entrainment of water droplets by the counter flow of high-temperature combustion products // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2016. V. 75. P. 54 – 65.
5. **Высокоморная О.В., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А.** Испарение и трансформация капель и больших массивов жидкости при движении через высокотемпературные газы. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2016. 302 с.

A.G. Islamova, P.P. Tkachenko, N.E. Shlegel, P.A. Strizhak

National Research Tomsk Polytechnic University
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia

**PROMISING TECHNOLOGIES FOR THE SECONDARY
ATOMIZATION OF LIQUID DROPLETS IN GAS
WITH DIFFERENT COMPOSITIONS AND PARAMETERS**

А.В. Беляев¹, Н.Е. Сидельников¹, А.В. Дедов¹

¹ Московский энергетический институт,
111116, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 17А*

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ В ПОТОКЕ КИПАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ В КАНАЛЕ МАЛОГО ДИАМЕТРА В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ПРИВЕДЕННЫХ ДАВЛЕНИЙ

Работа посвящена экспериментальному исследованию теплотдачи в вынужденном потоке кипящей жидкости в канале малого диаметра в широком диапазоне приведенных давлений.

Каналы малых диаметров (около 1 мм) с кипящим теплоносителем активно применяются в элементах компактных теплообменных аппаратов, которые используются во множестве отраслей промышленности. При проектировании таких теплообменников требуются надежные уравнения для расчета теплотдачи и потерь давления. В случае таких размеров каналов возможность расчетов по уравнениям для макроканалов зависит от приведенного давления. В области низких приведенных давлений существующие внутренние масштабы двухфазного потока (размер парового пузырька, диаметр жидкой капли и толщина пленки в дисперсно-кольцевом режиме течения) могут стать соизмеримыми с диаметром канала, что приводит к большому разнообразию режимов течения и делает невозможным расчеты по уравнениям для макроканалов. В области высоких приведенных давлений (с существенно меньшими размерами паровых пузырей) режимы течения в каналах малых диаметров приближаются к тем, что наблюдаются в макроканалах, что позволит использовать полученные для них расчетные соотношения. Вышесказанное говорит об актуальности исследования кипящих теплоносителей (в частности различных диэлектрических хладагентов, которые используются в компьютерной и криогенной областях техники) в каналах малого диаметра в условиях высоких приведенных давлений.

Необходимо проверить работоспособность известных и наиболее достоверных методов расчета теплотдачи в широком диапазоне приведённых давлений, вплоть до $p_r = p/p_{cr} \approx 0,7$, в канале с гидравлическим диаметром $d \approx 1$ мм, в диапазоне массовых скоростей, наиболее востребованных в технике. В работе представлен обзор наиболее известных методов расчета, полученных в каналах различного диаметра, и сравнение результатов расчёта

* А.В. Беляев, BeliaevAVL@mpei.ru

по ним с собственными экспериментальными данными. Эксперименты выполнены при нескольких значениях приведенного давления $p_r = 0,13, 0,43, 0,56$ и $0,70$ в диапазоне массовых скоростей $G = 200 \div 1000$ кг/м²с. На вход круглого вертикального канала с внутренним диаметром 1,1 мм и обогреваемой длиной 50 мм подавался фреон R125. Будут представлены первичные экспериментальные данные, полученные при различных массовых скоростях и приведенных давлениях, в виде зависимостей температуры стенки от теплового потока и кривых кипения. На рис. 1 представлена кривая кипения, полученная в сечении расположения одной из термпар рабочего участка, и результаты расчета по эмпирическим методикам [1-2] и по методу [3], в основе которого лежит методика расчета, впервые представленная в работе [4].

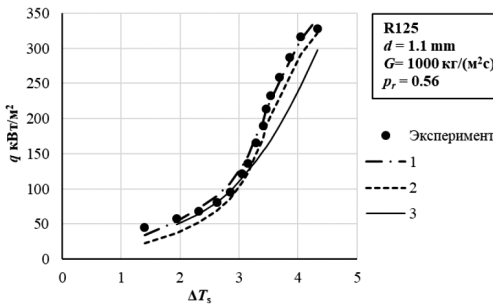


Рис. 1. Кривая кипения

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 22-79-00065.

Список литературы

1. **Tran T.N., Wambsgans M.W., France D.M.** Small circular-and rectangular-channel boiling with two refrigerants, *Int. J. Multiphase Flow* 22 (1996) 485– 498.
2. **Lazarek G.M., Black S.H.** Evaporative heat transfer, pressure drop and critical heat flux in a small vertical tube with R-113, *Int. J. Heat Mass Transf.* 25 (1982) 945 – 960.
3. **Belyaev A.V., Varava A.N., Dedov A.V., Komov A.T.** An experimental study of flow boiling in minichannels at high reduced pressure, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 110 (2017) 360–373.
4. **Ягов В.В.** Теплообмен при развитом пузырьковом кипении // *Теплоэнергетика*. 1988. №2. С. 4 – 9.

A.V. Belyaev¹, A.V. Dedov¹, N.E. Sidelnikov¹

¹ Moscow Power Engineering Institute,
Russia, 111116 Moscow, Krasnokazarmennaya, 17A

STUDY OF FLOW BOILING HEAT TRANSFER IN A CHANNEL OF SMALL DIAMETER IN A WIDE RANGE OF REDUCED PRESSURES

М.И. Ершов^{1,2}, В.Г. Тупоногов¹, А.Ф. Рьжков¹, С.О. Карманов^{1*}

¹ Уральский федеральный университет
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19

² Группа компаний «ПЛМ Урал»,
620131, Екатеринбург, ул. Metallургов, д. 16Б

ПУЛЬСАЦИИ ДАВЛЕНИЯ В АППАРАТЕ СО СТРУЙНЫМ ФОНТАНИРУЮЩИМ СЛОЕМ БИОМАССЫ

В условиях энергетического перехода биомасса, как углероднейтральное топливо замещает традиционные виды ископаемых топлив. Одним из наиболее эффективных способов использования биомассы, в том числе древесного опила, в энергетике и химической технологии является конверсия горючих компонентов исходного топлива в газообразное или жидкое состояние. Для получения синтез-газа из древесного опила в реакционной камере газификатора необходимо создавать гидродинамические режимы течения двухфазной среды, обеспечивающие равномерное и безагломерационное распределение твердых частиц по объему камеры и достаточное время пребывания в ней всего полидисперсного состава частиц.

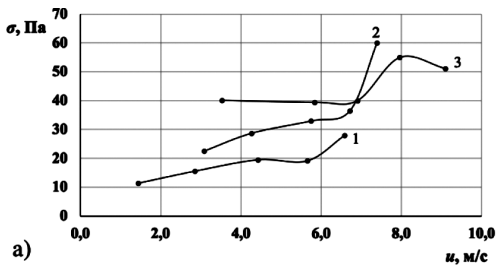
В данной работе исследовались пульсации давления в плоской лабораторной установке со струйным фонтанирующим слоем с поперечным сечением $0,5*0,02$ м и конусообразной формой нижней секции. В качестве дисперсного материала использовался опил сосны со средним диаметром $d_s = 1$ мм, плотностью $\rho_s = 550$ кг/м³ при высоте насыпного слоя $H = 100, 300, 500$ мм и скоростях воздуха во входном сечении конуса u от начала псевдооживления слоя – 1,5 м/с до начала выноса материала из установки – около 10 м/с. Пульсаций давления измерялись в основании слоя, преобразовывались во временные ряды и записывались в компьютер для статистической обработки.

Эксперименты показали высокие значения пиков давления при переходе слоя в псевдооживленное состояние, в 1,5-2 раза превышающих единичный вес слоя, обусловленные низкой порозностью начальной засыпки и остроугольной формой древесных частиц.

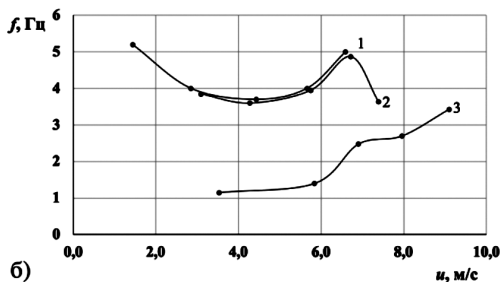
Полученные зависимости среднеквадратичного отклонения σ и основной частоты пульсаций давления f (рис. 1) имеют немонотонный вид и отражают смену режимов течения газодисперсной среды при увеличении скорости продувки от пузырькового режима к поточному. Зависимости основной частоты колебаний от высоты слоя при высоких скоростях газа

* С.О. Карманов, stepa.carmanov@yandex.ru

согласуется с данными других исследований [1,2] для режимов струйного фонтанирующего слоя.



а)



б)

Рис.1. Зависимости среднеквадратичного отклонения: *a* – и основной частоты спектра пульсаций давления; *б* – от скорости воздуха при различной высоте слоя:

1 – $H = 100$ мм;

2 – $H = 300$ мм;

3 – $H = 500$ мм

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., Múrl L. Characterization of the pneumatic behavior of a novel spouted bed apparatus with two adjustable gas inlets // Chemical Engineering Science. 2008. Vol. 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. Vol. 280. P. 72 – 82.

M.I. Ershov^{1,2}, *V.G. Tuponogov*¹, *A.F. Ryzhkov*¹, *S.O. Karmanov*¹

¹ Ural Federal University,

Russia, 620002 Ekaterinburg, Mira, 19

² Group of companies «PLM Ural»,

Russia, 620131 Ekaterinburg, Metallurgov, 16B

PRESSURE FLUCTUATIONS IN THE APPARATUS WITH JET SPOUTED BIOMASS BED

А.А. Клементьев, К.Б. Минко, В.И. Артемов

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

АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА К ЗНАЧЕНИЮ УГЛА СМАЧИВАНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ПЛЕНОЧНОЙ КОНДЕНСАЦИИ МЕТОДОМ VOF

В литературе существует недостаток информации об особенностях задания граничных условий при моделировании течения пленки методом VOF (Volume of Fluid). Использование различных граничных условий для моделирования процессов конденсации исследовано еще в меньшей степени. В работе [1] показано, что выбор различных граничных условий может приводить к различным стационарным режимам конденсации на цилиндре.

В данной работе представлены результаты численного анализа конденсации пара пентана на вертикальной пластине в двумерной постановке при различных значениях угла смачивания. Процесс конденсации моделировался с использованием метода VOF, реализованного в исследовательском CFD-коде ANES [2] и пользовательской модификации CFD-кода OpenFoam [1]. Для учета фазового перехода использовалась разработанная авторами модификация модели Lee [2] и модель Kleiner'a [1].

Используемая расчетная область представляет из себя прямоугольник 22 мм на 2 мм. Левая граница имитирует охлаждаемую стенку, на которой верхние 2 мм являются адиабатическим участком, а на нижних 20 мм поддерживается температура на 20 °С ниже температуры насыщения.

В расчетах использовались следующие граничные условия: на левой границе задается условие прилипания и непроницаемости; угол смачивания; ниже адиабатного участка фиксируется значение температуры стенки; на верхней и правой границах – температура насыщения, отсутствие жидкой фазы и атмосферное давление за вычетом гидростатического столба; на нижней границе – выходные условия. В начальный момент времени во всей расчетной области задавалась нулевая скорость пара, имеющего температуру насыщения.

На первом этапе было выполнено исследование сеточной независимости получаемых решений. Далее на выбранной оптимальной сетке были проведены расчеты с различными значениями угла смачивания. Анализ результатов расчетов (рис. 1) показал, что угол смачивания практически не влияет на получаемые значения толщин пленок, а значит и на локальные коэффициенты теплоотдачи.

Затем идентичная сеточная модель была построена в открытом коде OpenFoam и проведены расчеты с различными моделями конденсации. Сравнение полученных толщин пленок приведено на рис. 1.

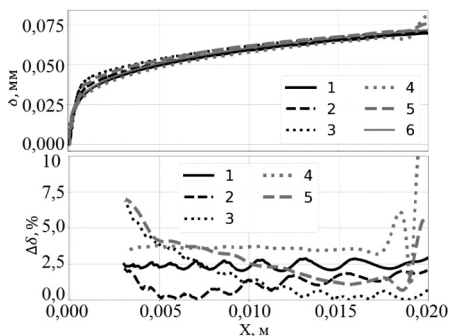


Рис. 1. Сравнение численно рассчитанных зависимостей толщин пленок с теоретическим решением, и их относительная погрешность, 1 – ANES, 0°, 2 – ANES, 50°, 3 – ANES, 150°, 4 – OpenFoam(CLEE_UNI model), 0°, 5 – OpenFoam(Kleiner model), 0°, 6 – теория Нуссельта

По результатам расчетов даны рекомендации по выбору граничных и начальных условий для численного моделирования конденсации пара на поверхности гладких тел методом VOF: начальное задание тонкой пленки жидкости, соизмеримой с размерами пленки Нуссельта, на охлаждаемой поверхности ускоряет выход на стационарное решение; при угле смачивания равном 0° устойчивое решение позволяет получить значительно более грубая сетка. Следует также отметить, что модель, реализованная в исследовательском коде ANES, характеризуется меньшими временами расчета.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (грант № 22-29-01457).

Список литературы

1. Kleiner T., Rehfeldt S., Klein H. CFD model and simulation of pure substance condensation on horizontal tubes using the volume of fluid method // Int. J. Heat Mass Transf. 2019. Т. 138. С. 420 – 431.
2. Мишко К.Б., Артемов В.И., Клементьев А.А. Моделирование методом VOF процессов конденсации неподвижного и движущегося насыщенного пара на поверхности горизонтальной трубы // Теплоэнергетика. 2023 г. №3 (принята к печати).

A.A. Klementiev, K.B. Minko, V.I. Artemov

National research institute «MPEI»,
Russia, 111250 Moscow, Krasnokazarmennaya, 14

ANALYSIS OF THE CALCULATION RESULTS SENSITIVITY TO THE CONTACT ANGLE WHEN MODELING FILM CONDENSATION USING THE VOF METHOD

А.А. Акашев, А.В. Решетников, В.Н. Скоков
Институт Теплофизики УрО РАН,
620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 107а*

КОРРЕЛЯЦИЯ ПУЛЬСАЦИЙ В ПРЕЦЕССИРУЮЩЕЙ СТРУЕ ПЕРЕГРЕТОГО ЭТАНОЛА

Изучение двухфазных потоков различных жидкостей является актуальной научной задачей в связи с их широким использованием при различных технологических процессах и во множестве технических аппаратах. При этом кинетика парообразования воды при различных степенях перегрева имеет существенные отличия от кинетики других жидкостей: спиртов, углеводородов, фреонов и др. Отличия касаются не только интенсивности парообразования (у воды она значительно выше [1]) при одинаковых относительных перегревах, но и температурных интервалов различных механизмов образования паровых зародышей (см. рис. 1). В силу этих и других отличий воды вытекает необходимость проведения исследований характера пульсационных процессов на ординарной жидкости, которые позволят получить результаты, носящие достаточно общий характер для большого класса органических и криогенных жидкостей. В наших исследованиях такой жидкостью являлся этанол.

Проведены опыты по истечению вскипающей жидкости из камеры высокого давления в атмосферу при температуре этанола в интервале 120 – 180 °С, что соответствовало его перегреву в струе на 40 – 100 °С. В опытах использовался короткий цилиндрический канал диаметром $d = 0,5$ мм и длиной $l = 0,7$ мм. Он обеспечивал не только резкое снижение давления в потоке жидкости до атмосферного, но и очень короткое время пребывания жидкости в канале. При этом ввиду малости скорости зародышеобразования пузырьков пара при малых перегревах этанола струя сохраняла преимущественно цилиндрическую форму на протяжении нескольких десятков сантиметров. Благодаря этому обнаружена прецессия перегретой струи: изменение направления оси спонтанно закрученной истекающей струи в пространстве. Эта прецессия обусловлена вскипанием на одиночных центрах на боковых стенках канала. Изучена корреляция между флуктуациями угла раскрытия струи (интегральные флуктуации) и локальными флуктуациями ядра струи в различных поперечных сечениях вскипающей струи. Измерения флуктуаций

*А.А. Акашев, akashev.anton@gmail.com

производилось посредством лазерного излучения в виде линейной развертки для интегральных пульсаций и точечного луча для локальных колебаний.

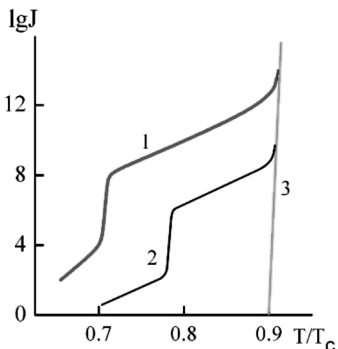


Рис. 1. Зависимость частоты зародышеобразования воды и органических жидкостей от приведенной температуры при атмосферном давлении:
1 – вода; 2 – органические жидкости;
3 – расчёт по теории гомогенной нуклеации

Найдено, что спектры мощности как локальных, так и интегральных флуктуаций изменялись обратно пропорционально частоте на небольших расстояниях от выходного среза канала. Это свидетельствовало о наличии в потоке перегретой жидкости $1/f$ флуктуаций и неустойчивости потока [2, 3]. Одновременное измерение интегральных и локальных флуктуаций позволило выявить достаточно высокий уровень корреляции между ними. Данное обстоятельство дало возможность связать крупномасштабные интенсивные интегральные пульсации в струе с наблюдаемой в ней прецессией.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00426, <https://rscf.ru/project/22-29-00426/>.

Список литературы

1. Метастабильная жидкость / В.П. Скрипов. М.: Наука, 1972. 312 с.
2. **Koverda V.P., Skokov V.N.** The origin of $1/f$ fluctuations and scale transformations of time series at nonequilibrium phase transitions // *Physica A*. 2005. V. 346 (3 – 4). P. 203 – 216.
3. **Решетников А.В., Мажейко Н.А., Скоков В.Н., Коверда В.П.** Неравновесные фазовые переходы в струе сильно перегретой воды // *ТВТ*. 2007. Т. 45. № 6. С. 838 – 846.

A.A. Akashev, A.V. Reshetnikov, V.N. Skokov

The Institute of Thermal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Russia 620016 Ekaterinburg, Amundsen St., 107a

CORRELATION OF PULSATIONS IN A PRECESSING JET OF SUPERHEATED ETHANOL

К.А. Бусов

Институт теплофизики УрО РАН
620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 107а***ПОЛНОЕ РАСКРЫТИЕ СТРУИ ПЕРЕГРЕТОЙ ВОДЫ
ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ЧЕРЕЗ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ КАНАЛЫ**

Вскипание струй перегретых жидкостей может приводить к образованию различных форм факелов распыла. В частности, при определенных условиях (взрывное вскипание [1]), геометрия элементов оборудования за выходным срезом канала, стационарное истечение метастабильной жидкости) наблюдается полное раскрытие потока. Проведенные исследования показали, что полный развал струи проявляется как при истечении жидкости через цилиндрический канал, так и при использовании каналов различной геометрической формы [2,3]. В данной работе представлено обобщение экспериментальных данных, полученных при исследовании процесса истечения метастабильной жидкости через короткие цилиндрические каналы.

Истечение вскипающей струи воды происходило из сосуда высокого давления через короткие цилиндрические каналы (исследовались каналы различных диаметров от $d = 0,2$ мм до $d = 0,6$ мм) с острыми входными и выходными кромками в атмосферу. Начальные условия (температура, давление) в рабочей камере соответствовали линии фазового равновесия и изменялись в широком диапазоне: $T = 380 - 580$ К, $p = 0,1 - 10$ МПа.

Изучение вскипающих струй позволило выделить определенные формы потока (рис. 1, *а - в*), характерные для различных перегревов и некоторые особенности, связанные с полным раскрытием истекающей жидкости.

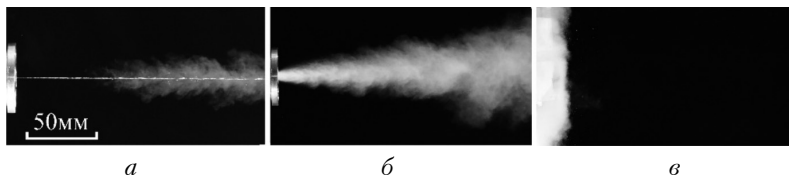


Рис. 1. Форма струи вскипающей воды при различных температурах:
а – $T = 180$ °С; *б* – $T = 200$ °С; *в* – $T = 220$ °С

*К.А. Бусов, kbusov@itpuran.ru

Из рис. 1 видно, что увеличение температуры (интенсивности вскипания) напрямую связано с изменением формы струи и величины ее угла раскрытия. Для всех исследованных каналов наблюдалось одинаковое изменение формы вскипающей жидкости – цилиндрический вид струи сменялся конической формой с последующим переходом в полное раскрытие. Стоит отметить, что только для канала диаметром $d = 0,6$ мм верной формы струи обнаружено не было.

Ряд особенностей был выявлен в случае использования канала диаметром $d = 0,2$ мм. Одна из особенностей состояла в смещении нижней (на десять градусов) и верхней (на тридцать пять градусов) температурных границ в сторону более высоких значений. Другая особенность была связана с резким увеличением угла раскрытия струи от $\alpha = 60^\circ$ до развернутого угла. В качестве третьей отличительной черты можно выделить проявление значительных пульсаций угла раскрытия вскипающей воды, которые наблюдались при переходе от конической к дискообразной форме струи.

Проведенные исследования по изучению процесса вскипания метастабильной жидкости, истекающей из цилиндрических каналов различных диаметров, позволили сделать ряд обобщений, касающихся формообразования струй, устойчивости полного раскрытия истекающей жидкости и температурных границ, в которых наблюдается определенный вид потока.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00426, <https://rscf.ru/project/22-29-00426/>

Список литературы

1. **Скрипов В.П.** Метастабильная жидкость. М.: Наука, 1972. 312 с.
2. **Бусов К.А., Мажейко Н.А.** Вскипание струи перегретой воды при истечении через канал квадратного сечения // ТВТ. 2021. Т. 59. № 2. С. 316 – 320.
3. **Busov K.A.** The effect of boiling-up on the shape and droplet size of a jet of superheated water discharged through a semi-cylindrical nozzle // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2022. Т. 136. 106199.

K.A. Busov

Institute of Thermal Physics UBRAS, Russia 620016 Yekaterinburg,
Amundsen, 107a

THE COMPLETE OPENING OF A JET OF SUPERHEATED WATER AT THE DISCHARGING THROUGH CYLINDRICAL NOZZLES

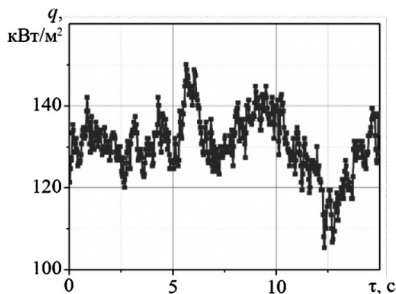
КОМПЛЕКСНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ВОДЯНОГО ПАРА НА НАРУЖНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРУБЫ

Предыдущие эксперименты по изучению теплообмена при конденсации насыщенного водяного пара на наружной поверхности трубы, выполненные с помощью градиентной теплотометрии, выявили существенную нестационарность теплового потока [1-2].

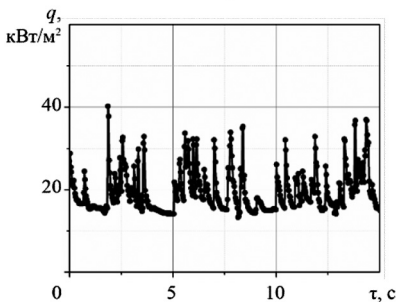
На рис. 1 приведены временные теплотграммы, построенные по показаниям градиентных датчиков теплового потока (ГДТП), при конденсации на наружной поверхности вертикальной трубы. На расстоянии 300 мм от верхнего среза трубы (рис. 1, *а*) средняя плотность теплового потока составляет 130 кВт/м^2 , а её пульсации достигают $\pm 20\%$ от среднего значения. Средняя плотность теплового потока по показаниям ГДТП, установленного на расстоянии 800 мм от верхнего среза трубы (рис. 1, *б*), составила 20 кВт/м^2 , уровень пульсации превышает среднее значение в 2 раза. Вызвало интерес наличие на временной теплотграмме (рис. 1, *б*) участков длительностью менее 2 с с постоянной плотностью теплового потока. Предполагаем, что водяной пар, сконденсировавшийся в верхней части трубы, образовал плёнку, которая далее под действием сил поверхностного натяжения разбилась на отдельные ручейки-резулеты. Для проверки принято решение совместить возможности градиентной теплотометрии с визуализацией течения.

Экспериментальная установка собрана по схеме «труба в трубе»: внутренняя труба, выполненная из нержавеющей стали ($d = 20 \text{ мм}$, $\delta = 2 \text{ мм}$), внешняя с внутренним диаметром 46 мм – из оптически прозрачного кварцевого стекла. В межтрубное пространство сверху подаётся насыщенный водяной пар, в металлическую трубу – охлаждающая вода. Три ГДТП из монокристаллического висмута размерами $7 \times 2,5 \times 0,3 \text{ мм}$ установлены на наружной поверхности трубы на расстоянии $x = 30, 230, 330 \text{ мм}$ от верхнего среза измерительного участка. В местах установки датчиков приварены термопары. Предусмотрена одновременная запись сигнала ГДТП и видеорегистрация течения конденсата с помощью экшн-камеры с частотой записи 240 кадр/с.

Предлагаемый подход позволит определить взаимосвязь плотности теплового потока и течения конденсата.



а)



б)

Рис. 1. Временная теплограмма при конденсации насыщенного водяного пара на наружной поверхности вертикальной трубы на расстоянии от верхнего среза трубы:
а — 300 мм; б — 800 мм

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (соглашение № 22-29-00152).

Список литературы

1. Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Y., Zainullina E.R. et al. An investigation into film condensation of saturated steam on tube surfaces by a gradient heatmetry // Therm. Eng. 2021. Vol. 68, No. 10, pp. 794 – 801.
2. Zainullina E.R. and Mityakov V.Yu. Heat Transfer Investigation during Condensation on the Horizontal Pipe // Inventions. 2023. 8, 2.

E.R. Zainullina, V.Yu. Mityakov, A. A. Emelianenko

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University,
Russia 195251 St.Petersburg, Polytekhnicheskaya, 29

COMPREHENSIVE STUDY OF FLOW AND HEAT TRANSFER DURING CONDENSATION OF WATER VAPOR ON THE OUTER SURFACE OF THE PIPE

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ МОДЕЛИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ ЛИ В ЗАДАЧАХ С ОБЪЕМНОЙ КОНДЕНСАЦИЕЙ В ПОТОКЕ

Область применения объемной конденсации достаточно обширна. Например, это явление используется для ожижения газов при дросселировании, для очистки дымогарных газов от механических примесей, для получения нанопорошков металлов и т.д. Однако объемная конденсация может быть нежелательным и даже опасным эффектом, например, в турбинах – паровых и холодильных (турбодетандерах) – образование капель конденсата в потоке вызывает ослабление элементов проточной части или полное разрушение ступени за счет капельной эрозии. Изучение процесса конденсации в потоке является актуальной задачей и требует тщательного рассмотрения.

На данный момент нет единой теории, которая позволяла бы с высокой достоверностью описывать фазовые переходы, происходящие при движении рабочего тела в потоке в широких границах начальных условий и режимов. С распространением расчетных пакетов для конечнообъемного моделирования (CFD) для решения технических и прикладных задач пользователи зачастую выбирают модели, которые уже встроены в сам пакет. Однако даже флагманские расчетные комплексы предлагают всего несколько достаточно простых вариантов, в числе которых модель W.H. Lee [1], при этом в документации не указываются конкретные ограничения для их применения. Цель настоящей работы заключается в оценке применимости модели фазовых переходов W.H. Lee для задач об объемной конденсации.

Постановка задачи выглядит следующим образом. Рассматривается сверхзвуковое истечение смесового потока, состоящего из неконденсирующегося газа-носителя и конденсирующихся паров, из расширяющейся части сопла Лавала в двумерной нестационарной постановке. Объемная конденсация учитывается независимым применением двух подходов: на основе модели [1], в том числе с различными модификациями, и путем решения кинетического уравнения для функции распределения капель по размерам [2] при интеграции в расчетный пакет специального расчетного модуля «Объемная конденсация» [3]. Для верификации используется сравнение с экспериментальными данными сторонних авторов [4]. В ходе работы получены распределения температур (рис. 1), давления, скоростей и степени пересыщения в проточной части сопла, а также вдоль центральной линии.

Показано, что модель фазовых переходов Lee дает заниженные оценки по общему тепловыделению в процессе, при этом также наблюдается сильное смещение зоны начала активной конденсации, по сравнению с экспериментальными данными и результатами решения кинетического уравнения для функции распределения капель по размерам.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ в рамках научного проекта № 22-19-00044

Список литературы

1. **W.H. Lee.** A pressure iteration scheme for two-phase flow modeling // Technical Report LA-UR 79-975, Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos, New Mexico, 1979.
2. **Стернин Л.Е.** Основы газодинамики двухфазных течений в соплах. М.: Машиностроение, 1974. 212 с.
3. **Сидоров А.А., Ястребов А.К.,** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2022660181 Российская Федерация. Специальный расчетный модуль «Объемная конденсация» 31.05.2022.
4. **Pathak H., Mullick K., Tanimura S. and Barbara E. Wyslouzil,** «Nonisothermal Droplet Growth in the Free Molecular Regime» Aerosol Science and Technology, т. 47, № 12, pp. 1310-1324, 2013.

A.A. Sidorov, A.K. Yastrebov

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,
Moscow, 111250, Krasnokazarmennaya st., 14

EVALUATION OF THE APPLICABILITY OF THE MODEL OF PHASE TRANSITIONS LEE IN PROBLEMS WITH VOLUME CONDENSATION IN A FLOW

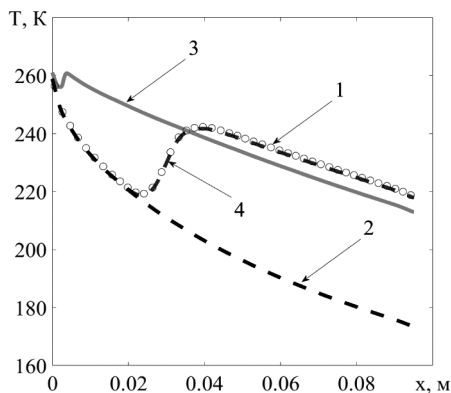


Рис. 1. Распределение температуры вдоль центральной линии сопла:
1 – экспериментальные данные;
2 – течение без конденсации;
3 – модель Lee; 4 – специальный расчетный модуль «Объемная конденсация»

А.А. Сидоров, А.К. Ястребов

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕМНОЙ КОНДЕНСАЦИИ В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ПАРОЖИДКОСТНОГО ТУРБОДЕТАНДЕРНОГО АГРЕГАТА

Парожидкостные турбодетандеры нашли свое применение в области получения сжиженных газов в качестве более термодинамически совершенного узла по сравнению с дросселем, активно применяемым в каскадных циклах [1]. Однако проектирование таких турбомашин вызывает существенные трудности в связи с отсутствием специальных инструментов для моделирования объемной конденсации рабочего тела в элементах проточной части турбинной ступени. Вследствие этого процесс проектирования осложняется из-за необходимости итерационного изменения геометрии проточной части и подбора режимных точек по результатам натурных испытаний, что, во-первых, негативно сказывается на сроках, а во-вторых, сильно влияет на итоговую стоимость проекта, не гарантируя при этом положительного результата.

Согласно имеющимся данным, которые в литературе представлены достаточно скудно, в настоящее время известно о применении парожидкостных машин с коэффициентом ожижения не выше 12-15%. При этом известны также проблемы таких агрегатов: элементы проточной части подвергаются эрозии и ослабляются в результате воздействия парокапельного потока, что может привести к разрушению, также наблюдаются области, в которых происходит обледенение.

Принцип действия реактивной парожидкостной турбомашин хорошо известен [1]: газ, поступающий в проточную часть ступени, расширяется в направляющем аппарате (НА) и частично конденсируется, затем набегающий поток приводит в движение рабочее колесо (РК), в котором процесс расширения и конденсации продолжается. После диффузора (Д) конденсат собирается в конденсатоприемнике и отводится, а газ поступает на всасывающую линию компрессора, после чего цикл замыкается. При этом, часть энергии, затрачиваемой на сжатие, можно компенсировать установкой на выходной вал турбодетандера генераторной установки.

Цель настоящей работы заключается в разработке пространственно одномерной методики проектирования проточной части ступени турбодетандерного агрегата с учетом объемной конденсации в элементах турбинной

ступени путем объединения известной расчетной методики для построения геометрических и термодинамических характеристик и решения кинетического уравнения для функции распределения капель по размерам или массам [2], что позволит получить распределения температур, давлений и скорости потока, а также локализовать области фазовых переходов.

Постановка задачи выглядит следующим образом. Рассматривается одномерное течение парогазовой смеси (или однокомпонентного конденсирующегося газа) в элементах проточной части ступени турбомашины. В качестве исходных данных выступают начальное давление и температура, степень расширения и массовый расход. Результатом применения этой методики должны стать геометрические размеры элементов проточной части, а также термодинамические характеристики ступени: конечная температура, действительный и располагаемый теплоперепад, степень реактивности, изоэнтропийный КПД и степень конденсации (коэффициент ожигения).

На основе полученных данных предлагается построить трехмерную модель и провести уточняющие расчеты с применением CFD и интегрированного в пакет специального расчетного модуля «Объемная конденсация» [3].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ в рамках научного проекта № 23-29-00540.

Список литературы

1. **Давыдов А.Б., Кобулашвили А.Ш., Шерстюк А.Н.** Расчет и конструирование турбодетандеров. М.: Машиностроение, 1987. 232 с.
2. **Стернин Л.Е.** Основы газодинамики двухфазных течений в соплах. М.: Машиностроение, 1974. 212 с.
3. **Сидоров А.А., Ястребов А.К.**, Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2022660181 Российская Федерация. Специальный расчетный модуль «Объемная конденсация» 31.05.2022.

A.A. Sidorov, A.K. Yastrebov

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,
Moscow, 111250, Krasnokazarmennaya st., 14

SIMULATION OF BULK CONDENSATION IN THE FLOW SECTION OF A VAPOR-LIQUID TURBO-EXPANDER UNIT

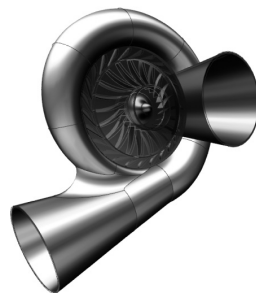


Рис. 1. Трехмерная модель турбинной ступени

А.С. Мордовской¹, А.С. Шамирзаев¹, В.В. Кузнецов¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1 *

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ СИСТЕМОЙ ВЫСОКОПЛОТНЫХ МИКРОСТРУЙ В ЩЕЛЕВОМ МИКРОКАНАЛЕ

Струйное охлаждение активно исследуется применительно к охлаждению компонентов силовой электроники. Опубликованные работы показывают, что струйное охлаждение является актуальной технологией для охлаждения теплонапряженных элементов силовой электроники. Настоящее исследование направлено на определение механизма теплообмена и кризиса теплоотдачи, установление зависимостей коэффициентов теплоотдачи при микроструйном охлаждении теплонапряженной поверхности бидистиллированной водой и терморегулирующей жидкостью HFE 7100 от величины теплового потока, и расхода охлаждающей жидкости.

Проведено экспериментальное исследование теплообмена при охлаждении водой и HFE7100 теплонапряженной поверхности, с использованием 36 затопленных микроструй (диаметр струи 174 микрона), расположенных в горизонтальном щелевом микроканале. Охлаждаемая поверхность – торец медного нагреваемого цилиндра диаметром 1 см. Расстояние от решетки формирователя микроструй до охлаждаемой поверхности 1 мм.

Проведено сравнение полученных данных с расчётом теплообмена при недогретом кипении в виде:

$$q_W^2 = \left(h_{con} \left(\frac{\mu_{L,W}}{\mu_{W,Sub}} \right)^N (T_W - T_{Sub}) \right)^2 + (h_{boil} (T_W - T_{Sat}))^2. \quad (1)$$

Здесь, T_W – температура стенки; T_{Sat} – температура насыщения; T_{Sub} – температура натекающей жидкости; h_{Boil} – коэффициент теплоотдачи при кипении по уравнению С.С. Кутателадзе (1990) [1]; h_{jet} – коэффициент конвективной теплоотдачи при струйном охлаждении по модели Martin H (1977) [2], степень N учитывающая интенсификацию конвективной теплоотдачи из за изменения свойств жидкости с температурой равна – 0,14 для ламинарных струй ($Re < 2000$) и – 0,11 для турбулентных струй ($Re > 2000$).

Установлено, что для воды, когда температура стенки становится близка к температуре насыщения, для скоростей 1,7 и 3 м/с наблюдается интенсификация конвективной теплоотдачи, расчёт по уравнению (1) лежит ниже экспериментальных данных.

*А.С. Мордовской, alexsmort@gmail.com

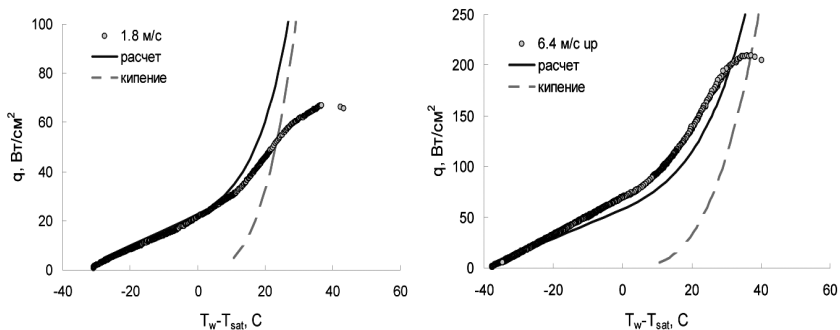


Рис. 1. Сравнение экспериментальных и расчетных (1) кривых кипения при охлаждении HFE 7100 36 струй мишени диаметром 10 мм при скоростях 1,8 и 6,4 м/с

В то же время, для HFE-7100 в условиях, когда температура стенки становится близка к температуре насыщения, для всех скоростей наблюдается интенсификация теплоотдачи, вплоть до достижения критического теплового потока для всех скоростей кроме скорости 1,8 м/с, где наблюдается ухудшенный, по сравнению с расчётом по уравнению (1), теплообмен.

Установлено, что при использовании HFE7100 бескризисный режим микроструйного охлаждения достигнут при плотности теплового потока, превышающей 235 Вт/см² и скорости струй до 10 м/с.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №21-19-00626.

Список литературы

1. **Кутателадзе С.С.** Теплообмен и гидравлическое сопротивление. Руководства. М.: Энергоатомиздат. 1990.
2. **Martin H.** Heat and mass transfer between impinging gas jets and solid surfaces//Advances in heat transfer. Elsevier, 1977. Т. 13. С. 1 – 60.

A.S. Mordovskoy¹, A.S. Shamirzaev¹, V.V. Kuznetsov¹

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Russia 630090 Novosibirsk, 1-nd Academician Lavrentiev Avenue

AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF COOLING BY A SYSTEM OF DENSE MICROJETS IN A SLOT MICROCHANNEL

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ ЗЕОТРОПНОЙ СМЕСИ R32/R134A В МИКРОКАНАЛЬНОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ

В настоящее время, в соответствии с концепцией продвижения озоно-безопасных рабочих тел с низкими потенциалами глобального потепления, при создании высокоэффективных и экологически безопасных охлаждающих систем большое внимание уделяется использованию смесевых хладагентов. Зеотропные смеси используются во множестве технологических процессов. Данная работа направлена на экспериментальное исследование теплообмена и критического теплового потока в микроканальном теплообменнике при кипении не азеотропной смеси R32/R134a.

Эксперименты проведены в теплообменнике с медной теплообменной поверхностью шириной 40 мм длиной 80 мм содержащем 5 микроканалов сечением 0,5x2 мм длиной 80 мм, расстояние между каналами 6 мм. На вход в теплообменник подается на 1-2 градуса недогретая до температуры закипания смесь R32/R134a с молярной концентрацией компонент соответствующей максимальному температурному глайду 65 % / 35 % соответственно. Подвод тепла осуществлялся посредством нагревательных картриджей вмонтированных во внешний нагревательный блок. В ходе экспериментов измерялись давление и температура во входной и выходной камерах теплообменника. Во внешней стенке теплообменника расположены 2 ряда термопар для измерения температуры и градиента температуры по длине теплообменника. Термопары расположены на расстоянии 10, 20, 35, 60, 70 мм от входа в микроканалы. Массовый расход измерялся термомассовым расходомером LIQUIFLOW. Диапазон массовых расходов от 100 до 300 кг/м²с, что соответствует числам Рейнольдса по жидкости от 560 до 1700. Эксперименты проведены при абсолютном давлении на входе в теплообменник около 12 бар.

Типичная зависимость средних коэффициентов теплоотдачи от выходного паросодержания показана на рис. 1. В условиях недогрева теплоотдача соответствует однофазной конвекции при ламинарном течении.

Проведено сравнение экспериментальных данных с расчётом по модели для бинарных зеотропных смесей из [1]. Методика расчёта условий фазового равновесия и теплофизических свойств смеси проведена по методике предложенной в работе [2].

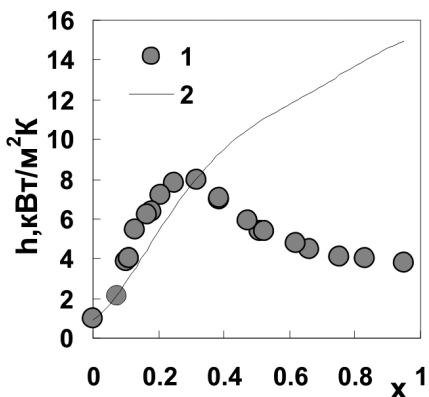


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплоотдачи от выходного паросодержания при $G = 300 \text{ кг/м}^2\text{с}$: 1 – эксперимент; 2 – расчет по [1]

С увеличением теплового потока увеличивается выходное паросодержание, и коэффициенты теплоотдачи растут вплоть до достижения массового паросодержания 0,3. При дальнейшем увеличении теплового потока наблюдается ухудшение теплоотдачи. В то же время наличие тяжело кипящего компонента R134a в смеси препятствует развитию кризисных явлений и кризиса теплообмена не наблюдается вплоть до полного испарения жидкости. Экспериментальные данные хорошо соответствуют расчёту по модели для бинарных зетропных смесей из [1] вплоть до начала ухудшения теплообмена.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 22-29-00168.

Список литературы

1. **Zou X. et al.** Experimental study on saturated flow boiling heat transfer of R170/R290 mixtures in a horizontal tube // Int J Refrig 2010.V 33. № 2. P. 371 – 380.
2. **Shamirzaev A.** On the Pressure Drop Calculation During the Flow of Two-Phase Non-Azeotropic Mixtures // Int. J. Multiph. Flow. 2022, 104314.

A.S. Mordovskoy, A.S. Shamirzaev

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS,
Russia 630090 Novosibirsk, Lavrentiev ave. 1

EXPERIMENTAL STUDY OF HEAT TRANSFER DURING BOILING OF R32/R134A ZETROPIC MIXTURE IN A MICROCHANNEL HEAT EXCHANGER

И.А. Корняков, Ю.Ю. Пузина, И.А. Ячевский, А.П. Крюков

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ПАРОВОЙ ПЛЕНКИ ПРИ КИПЕНИИ ГЕЛИЯ II С РАСКРЫТОЙ МЕЖФАЗНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Работа направлена на экспериментальные и теоретические исследования движения межфазной поверхности He-II внутри пористого тела, погруженного в жидкость. При подаче теплового потока на цилиндрическом нагревателе образуется паровая пленка. На основании видеозаписей и показаний датчиков проводится анализ протекающих процессов в сопряженной задаче на границах раздела нагреватель – пар – жидкость, определяются основные параметры теплопереноса в существенно неравновесных условиях. Описание экспериментальной установки и схема автоматизации подробно представлены в [1].

Во время проведения эксперимента наблюдается несколько режимов на цилиндрическом нагревателе при тепловых нагрузках ($10,9 \div 33,3$) кВт/м²: а) шумовой; б) с тонкой коаксиальной пленкой; в) с колоколообразной пленкой; г) с раскрытой межфазной поверхностью. Последний режим характеризуется тем, что верхняя часть экспериментальной ячейки (внутри пористой оболочки) заполнена паром. Уровень He-II располагается примерно посередине нагревателя так, что под ним образуется коаксиальный прогиб межфазной поверхности (рис. 1). Температура нагревателя при этом может достигать (100÷170)К, тогда как температура жидкости (1,4÷2,17)К. В результате просмотра видеозаписей экспериментов (19 серий) в десяти получен режим с раскрытой пленкой, для которого определены параметры (температура нагревателя, давление) существования такого режима.

Аналитическое описание процессов теплопереноса и расчета расстояния до межфазной поверхности представлено в [2]. Итоговое дифференциальное уравнение относительно толщины паровой пленки формулируется так:

$$\frac{d\delta}{d\varphi} = \frac{B_1 - \cos(\varphi\delta^3)}{3 \sin(\varphi\delta^2)}, \text{ где коэффициент: } B_1 = \frac{q_w R_w \xi \eta''}{\rho' \rho'' g L}.$$

где δ – толщина паровой пленки; φ – угол; q_w – удельный тепловой поток; R_w – радиус нагревателя; ξ – коэффициент гидравлического сопротивления; η'' – динамическая вязкость пара; ρ' – плотность жидкости; ρ'' – плотность пара; g – ускорение свободного падения; L – теплота парообразования.

На рис. 2 представлен результат решения дифференциального уравнения при $\varphi = 0$ в лобовой точке для различных значений теплового потока и соответствующе экспериментальные данные.

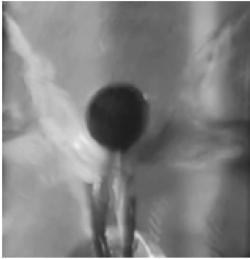


Рис. 1. Режим кипения с раскрытой межфазной поверхностью

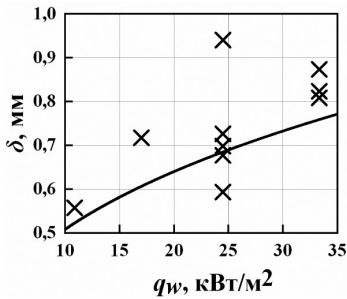


Рис. 2. Зависимость толщины паровой пленки δ в лобовой точке от удельного теплового потока q_w : линия – аналитическое решение; точки – экспериментальные данные

Анализ результатов эксперимента выполнен при частичной поддержке Российского Научного Фонда (проект №23-29-00342).

Список литературы

1. **Володин И.В., Корняков И.А., Ячевский И.А.** Автоматизация экспериментального стенда по исследованию кипения сверхтекучего гелия // Материалы VI Международной научно-практической конференции «Информатизация инженерного образования» 12-15 апреля 2022 г. М.: Издательство МЭИ. С. 64 – 68.
2. **Королев П.В., Пузина Ю.Ю.** Об одном эксперименте по кипению сверхтекучего гелия на цилиндрическом нагревателе // Труды XX Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева (25-29 мая 2015 г., г. Звенигород). М.: Издательский дом МЭИ, 2015. С. 323 – 326.

I.A. Korniyakov, Yu. Yu. Puzina, I.A. Yachevsky, A.P. Kryukov

Moscow Power Engineering Institute,
Russia 111250 Moscow, Krasnokazarmenaya, 14

DETERMINATION THICKNESS OF THE VAPOR FILM DURING BOILING OF HELIUM II WITH AN OPEN INTERFACIAL SURFACE

Д.А. Коновалов^{1,2}, Н.Н. Кожухов², И.И. Медведев², М.Т. Орехова²

¹ ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 17

² ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет,
394020, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84*

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ ОХЛАДИТЕЛЯ В ПОРИСТОМ КОМПАКТНОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ

Современное развитие техники и технологий связано с разработкой компактных устройств различного предметного назначения с интенсивным тепловыделением. Задача отвода критических тепловых потоков успешно решается применением теплообменников с развитыми поверхностями, в т.ч. пористыми и микроканальными [1]. Анализ исследований за последние несколько лет показал, что механизмы интенсификации теплообмена в условиях однофазного течения охладителя практически исчерпаны и предпочтение отдается фазовым переходам и методам их интенсификации.

Исследованию интенсификации теплообмена при фазовых переходах посвящены работы Д.А. Лабунцова, А.В. Дедова, Ю.А. Кузма-Кичты, А. Faghri и многих других [2-5]. Основные направления интенсификации: создание условий влияния на внутренние механизмы кипения и развитие поверхности теплообмена. К внутренним механизмам можно отнести решения по увеличению центров парообразования, изменения притока жидкости и ускоренной эвакуации пара, изменения условий смачиваемости тепловыделяющей поверхности и пр. Интенсификация в свою очередь связана с созданием развитых поверхностей или технологий их модификации [3, 6].

В настоящей работе численно решена задача теплообмена при вынужденном течении теплоносителя в канале, заполненном пористой средой, в условиях вскипания при изменении внутренней геометрии.

Расчетная область представлена на рис. 1. Будем рассматривать канал, заполненный пористой средой с размерами 40×5×10 мм. В канале в режиме ламинарного течения проходит жидкий теплоноситель (вода). Основание канала подвержено воздействию теплового потока в диапазоне от 100 до 250 Вт/см². На верхней границе канала происходит теплообмен с окружаю-

* Д.А. Коновалов, dmikonovalov@yandex.ru

щей средой, которая имеет температуру 20 °С. В ходе моделирования использовался программный комплекс Comsol. В ходе расчетов осуществлялось также варьирование пористости ε в диапазоне от 0,4 до 0,9.

В результате моделирования получены поля температур и значения критических тепловых потоков при изменении как расхода теплоносителя, так и пористости канала.

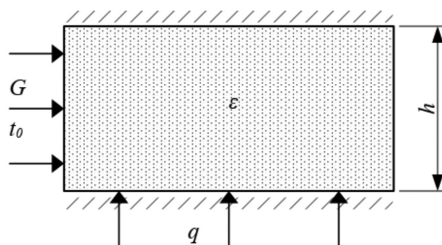


Рис. 1. Расчетная область решения

Список литературы

1. **Saman R., Mohammad H. K., Kyung C. K., Omid S.A.** Potentials of porous materials for energy management in heat exchangers –A comprehensive review // *Applied Energy*. 2019. V. 243. Pp. 206 – 232.
2. **Лабунцов Д.А.** Физические основы энергетики. Избранные труды по теплообмену, гидродинамике, термодинамике. – М. Издательство МЭИ, 2000. 388 с.
3. **Дедов А.В.** Обзор современных методов интенсификации теплообмена при пузырьковом кипении // *Теплоэнергетика*. № 12. 2019. С. 18 – 54.
4. **Kuzma-Kichta Yu.A., Lavrikov A.V., Shustov M., Kustova E.A., Ivanov N.S., Kuleshov E.A., Kiselev A.S.** Heat transfer crisis investigation in a microchannel with and without nanoparticles coating // (2020) *Journal of Physics: Conference Series*, 1683 (2), статья № 022087.
5. *Transport Phenomena in Multiphase Systems / Amir Faghri, Yuwen Zhang*. San Diego.: Academic Press, 2006. 1030 p.
6. **Kozhukhov N.N, Kozhukhova E.A., Kononov D.A., Prutskikh D.A., Perunova V.I.** Modeling of heat transfer in an element with anisotropic porosity // (2021) *Journal of Physics: Conference Series*, 2039, статья № 012011.

D.A. Kononov^{1,2}, N.N. Kozhukhov², I.I. Medvedev², M.T. Orekhova²

¹ National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,
Russia 11250 Moscow, Krasnokazarmennaya, 17

² Voronezh State Technical University,
Russia, 394020, Voronezh, 20-let Oktyabrya, 84

NUMERICAL SIMULATION OF HEAT TRANSFER DURING BOILING OF A COOLER IN A POROUS COMPACT HEAT EXCHANGER

А.С. Томин, М.З. Файзуллин, М.С. Захаров, В.П. Коверда

Институт теплофизики УрО РАН,
620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 107а*

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ АМОРФНЫХ ВОДНО-ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ КОНДЕНСАЦИЕЙ ВСТРЕЧНЫХ ПОТОКОВ

Аморфный лед, осажденный из паровой фазы в вакууме на холодную подложку, в зависимости от условий осаждения, может быть пористым с высокой удельной площадью поверхности [1]. На пористость могут влиять, в том числе, температура подложки, скорость и угол осаждения. При адиабатическом истечении сверхзвуковых струй в вакууме возможно образование нанокластеров [2], а осаждение таких потоков позволяет получить высокопористый аморфный конденсат. Пористый аморфный лед способен к адсорбции окружающих молекул газа в результате капиллярной конденсации. Регулированием потоков при совместном осаждении воды и газа удается получить газонасыщенный аморфный лед заданного состава. Нагрев аморфных водно-газовых смесей приводит к кристаллизации и возможному захвату молекул газа с образованием газового гидрата [3]. Такое соединение, благодаря эффекту самоконсервации, способно сохраняться при нормальном давлении до 273 К, а при разложении может выделить газ, объем которого более чем в 100 раз превышает объем газогидрата.

Данная работа направлена на исследование параметров, влияющих на конденсацию встречных струй водяного пара и этана на охлаждаемую жидким азотом медную подложку. По температурной зависимости диэлектрических свойств и методом ДТА определены температуры стеклования T_g и кристаллизации T_c образцов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00116, <https://rscf.ru/project/23-29-00116/>

Список литературы

1. Control of amorphous solid water morphology using molecular beams. I. Experimental results / Greg A. Kimmel, K.P. Stevenson, Z. Dohnalek [etc.] // J. Chem. Phys. 2001. V. 114. P. 5284 – 5294.

*А.С. Томин, andrey.itf.2017@yandex.ru

2. **Inoue T.** Formation of water clusters in a free molecular jet of binary mixtures/
T. Inoue, S. Kotake // J. Chem. Phys. 1989. V. 91. P. 162 – 169

3. **Faizullin M.Z.** Formation of clathrate hydrates under crystallization of gas-saturated amorphous ice / M.Z. Faizullin, A.V. Vinogradov, V.P. Koverda // Int. Journal of Heat and Mass Transfer. 2013. V. 65. P. 649 – 654.

A.S. Tomin, M.Z. Faizullin, M.S. Zakharov, V.P. Koverda

Institute of Thermal Physics UB RAS,
620016, Ekaterinburg, Amundsen, 107a

**INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF AMORPHOUS
WATER-GAS MIXTURES PRODUCED BY COUNTERFLOW
CONDENSATION**

В.С. Терешкин¹, В.Ю. Левашов²

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111116, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14*

²Научно-исследовательский институт механики МГУ имени М. В. Ломоносова,
119192, г. Москва, Мичуринский пр., д. 1

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ ГОМОГЕННОЙ НУКЛЕАЦИИ

В работе [1] показано, что, при интенсивном испарении жидкости, образовавшийся около поверхности раздела фаз пар пересыщен, причем увеличение интенсивности процесса ведет к увеличению степени пересыщения (отношение парциального давления пара к давлению насыщения). Известно, что в таких условиях возможен процесс гомогенной конденсации пара [2].

Одним из возможных подходов, позволяющих оценить влияние процесса гомогенной нуклеации на интенсивность испарения, является метод молекулярно-динамического (МД) моделирования [3]. Данный метод позволяет рассчитать положения и скорости частиц на заданном промежутке времени. Пример использования молекулярно-динамического подхода к исследованию процессов с испарением / конденсацией представлен в [4].

Один из вопросов, возникающих при рассмотрении процесса гомогенной нуклеации методами МД моделирования, является определение числа кластеров и их размеров [5]. Для этих целей, прежде всего, необходимо определить само понятие кластера. На первый взгляд одним из самых простых и очевидных является критерий близости частиц друг к другу. В этом случае предполагается, что частицы находятся в связанном состоянии, если расстояние между ними меньше заданного, называемого радиусом связанности. Радиус связанности обычно выбирают таким, чтобы он соответствовал первому минимуму радиальной функции распределения.

Существуют различные подходы к определению кластеров в молекулярной динамике, некоторые из которых представлены в работе [6]

В настоящей работе предложен алгоритм сортировки частиц по кластерам, а также определения размеров и положений полученных кластеров при моделировании процесса гомогенной нуклеации методом молекулярной динамики. Пересыщенный пар моделируется системой одноатомных частиц (рис. 1).

* В.С. Терешкин, tereshkinvadimst@gmail.com

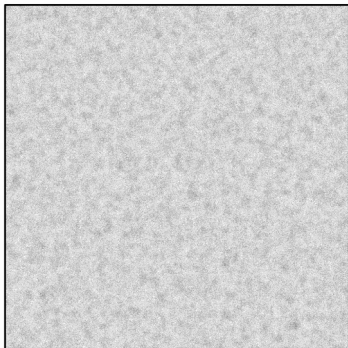


Рис. 1. Пересыщенный пар модельного аргона, полученный в результате МД моделирования. Число частиц в системе примерно три миллиона

Результатом моделирования является зависимость числа кластеров заданного размера от времени. Рассмотрены различные подходы для определения кластеров, а также различные степени пересыщения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00044.

Список литературы

1. **Крюков А.П.** Процессы переноса в существенно неравновесных системах: учебное пособие. М.: МЭИ, 2013.
2. **Kalikmanov V.I.** Nucleation Theory, Springer Netherlands, 2013.
3. **Rapaport D.C.** The art of molecular dynamics simulation. Second Edition, Cambridge University Press, 2004.
4. **Zhakhovsky V.V., Kryukov A.P., Levashov V.Y., Shishkova I.N., Anisimov S.I.** Mass and heat transfer between evaporation and condensation surfaces: Atomistic simulation and solution of Boltzmann kinetic equation // PNAS, Vol. 116, no. 37, 2019
5. **Zhukhovitskii D.I., Zhakhovsky V.V.** Thermodynamics and the structure of clusters in the dense Au vapor from molecular dynamics simulation // J. Chem. Phys., Vol. 152, 2020.
6. **Sator N.** Clusters in simple fluids // Physics Reports 2003, 376 (1). P. 1 – 39.

V.S. Tereshkin¹, V.Yu. Levashov¹

¹Institute of mechanics Lomonosov Moscow State University
Russia, 119192, Moscow, Michurinskii pr., 1

MOLECULAR DYNAMICS APPROACH TO THE STUDY OF HOMOGENEOUS NUCLEATION

В.О. Майоров¹, В.Ю. Леваинов¹, А.П. Крюков², В.С. Терешкин^{1,2}

¹ Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова,
119192, г. Москва, Мичуринский проспект, д. 1*

² Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111116, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГОМОГЕННОЙ НУКЛЕАЦИИ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ

Хорошо известно, что спонтанная объемная конденсация пара возможна только в тех случаях, когда давление пара превосходит давление насыщения при температуре пара, то есть пар является пересыщенным. В [1] показано, что при стационарном испарении жидкости в полубесконечное пространство пар в непосредственной близости от границы раздела фаз находится в пересыщенном состоянии. При этом степень пересыщения пара увеличивается с ростом интенсивности испарения.

Объемная конденсация пересыщенного пара может привести к изменению параметров среды, в частности, к уменьшению плотности пара в результате образования капель и к повышению температуры вследствие выделения теплоты фазового перехода. Процесс испарения определяется температурой поверхности раздела и одной из величин, характеризующих среду вдали от слоя Кнудсена, например давление или плотность, поэтому объемная конденсация может оказывать существенное влияние на интенсивность испарения. Совместное решение задач об испарении и объемной конденсации связано с различными трудностями, поэтому на начальном этапе предлагается упрощенный подход, который позволяет оценить при каких условиях влияние объемной конденсации значительно.

Рассматривается область, заполненная паром, при этом параметры пара соответствуют определенной интенсивности испарения, согласно решению задачи об стационарном испарении [1]. Предполагается, что плотность пара изменяется за счет образования критических капель жидкости, при этом температура пара остается постоянной. Уравнение, описывающее эволюцию плотности пара, интегрируется по времени до тех пор, пока она не станет меньше минимальной величины, соответствующей максимальной интенсивности испарения. Также расчетное время ограничивается 0,1 мс, чтобы исключить из рассмотрения случаи с низкой интенсивностью нуклеации. Таким

* В.О. Майоров, mayorovvo@imec.msu.ru

образом в результате расчета определяется время, за которое интенсивность испарения возрастает от начального значения до максимально возможного.

Расчеты проведены для температуры поверхности, соответствующей атмосферному давлению. Были рассмотрены следующие вещества: вода, азот, кислород, этанол, метанол, бутан, пропан, бензин и фреон R134a. Оценки показывают, что влияние объемной конденсации на скорость испарения наблюдается при относительно высоких значениях безразмерного массового потока для всех веществ кроме азота и кислорода (рис. 1). При этом диапазон значений испарительного потока для различных веществ отличается. Однако, показано, что безразмерная работа образования критической капли во всех случаях, когда необходимо учитывать конденсацию, меньше 20.

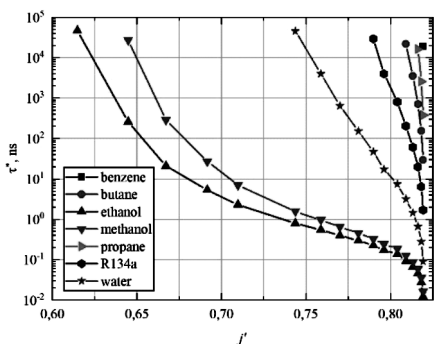


Рис. 1. Зависимость времени достижения максимальной интенсивности испарения от начального испарительного потока

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-19-00044).

Список литературы

1. Labuntsov D.A., Kryukov A.P. Analysis of intensive evaporation and condensation // Int. J. Heat Mass Transf. 1979. V. 22(7). P. 989 – 1002.

V.O. Mayorov¹, V.Yu. Levashov¹, A.P. Kryukov²

¹Institute of Mechanics Lomonosov MSU
Russia 19192, Moscow, Michurinskii pr., 1.

²National research university «MPEI»
Russia, 111116 Moscow, Krasnokazarmennaya, 14

ASSESSING THE EFFECT OF HOMOGENEOUS NUCLEATION ON THE INTENSITY OF THE EVAPORATION PROCESS

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КАПЕЛЬ ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО БИОПОЛИМЕРА, НАПОЛНЕННОГО ЧАСТИЦАМИ МИКРОГЕЛЯ, С ГЛАДКОЙ И НАНОВОЛОКНИСТОЙ ПОВЕРХНОСТЯМИ

Тканевая инженерия стала привлекательной областью исследований в связи с развитием регенерации функциональных живых тканей или органов [1]. Взаимодействие капель жидкостей с дисперсной фазой представляют практический интерес для широкого ряда приложений, так как гетерогенные жидкости позволяют усовершенствовать ключевые характеристики рабочих процессов [2]. Однако наличие дисперсной фазы в жидкости осложняет анализ результатов и вносит особенности в известные процессы, возникающие при соударении капли с поверхностью [3]. Ряд таких особенностей с эмульсиями на основе углеводов рассмотрены ранее [4]. Процесс взаимодействия микрогеля с поверхностью является неотъемлемой частью технологии производства тканей, а исследование особенностей и динамики поведения частиц микрогеля при печати тканей является актуальным вопросом, определяющим направления развития технологии. Поэтому целью данной работы является экспериментальное исследование динамики соударения капли биополимера, наполненной заданным количеством частиц микрогеля, с гладкой и нановолокнистой гидрофобными поверхностями.

Для формирования полимерной эмульсии используется водный раствор агара в качестве дисперсионной среды, а также частицы микрогеля, сформированные из водного раствора альгината натрия, и кросслинкер (водный раствор хлорида кальция). Концентрации растворов альгината натрия и хлорида кальция подобраны в соответствии с обеспечением необходимого условия формирования однородной структуры «ядро-оболочка» за счет градиента поверхностного натяжения между двумя взаимодействующими жидкостями. Количество частиц микрогеля в капле варьируется исходя из задачи моделирования поведения капель с живыми микроорганизмами при реализации процесса биопечати, заключенными в частицах-контейнерах микрогеля. Генерирование частиц микрогеля происходит в ходе управляемой неустойчивости Рэлея-Плато в смешивающем микроканальном устройстве. В качестве

*М.В. Пискунов, piskunovmv@tpu.ru (E-mail одного из авторов)

поверхности взаимодействия используются кварцевое стекло с гладкой на молекулярном уровне поверхностью и нановолокнистое полотно, изготовленное методом электроспиннинга из 5-% раствора сополимера винилиденфторида с тетрафторэтиленом. Основным методом исследования является высокоскоростная видеорегистрация теневого изображения.

Предложена физическая модель гидродинамического поведения капель полимерных эмульсий при растекании вдоль нановолокнистого покрытия, основанная на предположении о сильной неоднородности растяжения контактной линии из-за усиления завихрения течения вследствие добавления фактора шероховатости поверхности. Также предложена физическая модель для случая гладкой поверхности, в рамках которой предполагается торможение потока несущей среды частицами микрогеля. Подтверждена легитимность предложенных физических моделей на основе анализа результатов наблюдений из данных высокоскоростной видеорегистрации процесса растекания капель. Выведено эмпирическое выражение для коэффициента максимального растекания капель полимерных эмульсий с использованием составного безразмерного комплекса, учитывающего как свойства жидкостей обеих фаз и количество частиц микрогеля в дисперсной фазе, так и шероховатость поверхности соударения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20109, <https://rscf.ru/project/22-29-20109/> и средств Администрации Томской области.

Список литературы

1. **Magalhaes R.S., Williams J.K., Yoo K.W., Yoo J.J., Atala A.** A tissue-engineered uterus supports live births in rabbits, *Nat. Biotechnol.* Springer US. 2020. Т. 38, № 11. С. 1280 – 1287.
2. **Blanken N., Saleem M.S., Thoraval M.-J., Antonini C.** Impact of compound drops: a perspective, *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.* Elsevier Ltd. 2021. Т. 51. P. 101389.
3. **Ashikhmin A.E., Semyonova A.E., Fedorov V.S., Misyura S.Y., Piskunov M.V.** Nucleate boiling heat transfer during water-IN-oil emulsion drop impact onto a heated solid surface, *Int. J. Therm. Sci.* 2023. Т. 184. P. 107989.
4. **Piskunov M.V., Khomutov N.A., Semyonova A.E., Ashikhmin A.E., Misyura S.Y.** Unsteady convective flow of a preheated water-in-oil emulsion droplet impinging on a heated wall, *Phys. Fluids.* 2022. Т. 34, № 9. P. 93311.

M.V. Piskunov, A.E. Ashikhmin, V.S. Fedorov

National Research Tomsk Polytechnic University,
Russia 634050 Tomsk, 30, Lenin Avenue

IMPACT OF THERMOSENSITIVE BIOPOLYMER DROPS FILLED WITH MICROGEL PARTICLES ON SMOOTH AND NANOFIBER HYDROPHOBIC SURFACES

*А.А. Пономарев^{1,2}, Д.К. Шарборин², М.Ю. Хребтов²,
Р.И. Мулляджанов^{1,2}, В.М. Дулин²*

¹ Новосибирский государственный университет,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, д. 2

² Институт теплофизики СО РАН,
630090, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, д. 1

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА УВЕЛИЧЕНИЯ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ ЭТАНОЛА ПРИ НАЛИЧИИ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ

Понимание принципов распространения пламени предварительно перемешанной смеси в облаке капель актуально для многих применений горения, включая горение распыленного топлива в двигателях внутреннего сгорания и авиационных газовых турбинах. Хотя реалистичные системы включают полидисперсные аэрозоли и турбулентные потоки, фундаментальное понимание факторов, контролирующих распространение пламени, могут быть обеспечены изучением горения монодисперсных взвесей капель в ламинарном режиме на модельных задачах. Одной из таких задач является горение ламинарного конусного пламени, однако в литературе представлено небольшое количество статей, посвященных исследованию газочапельным пламен этим методом [1, 2]. В области численного моделирования в литературе не имеется данных по отработке данной задачи в трехмерной постановке. В настоящей работе проведено трехмерное численное исследование особенностей горения ламинарного конического пламени газочапельной взвеси этанола на основе эксперимента.

Численный расчет горения газообразного этанола с добавлением капель на выходе из сопла с профилем Витошинского был проведен в 3D постановке. Расчетная область состояла из ~4 млн гексагональных ячеек. Значения, используемые в расчете, задавались в соответствии с экспериментом. Полный массовый расход спирта составил 2,1 г/мин (коэффициент избытка топлива ~1,47), из которых массовый расход газа — 1,6 г/мин и 0,5 г/мин в виде капель. Размер капель был измерен с помощью измерительного комплекса SpraySpy (AOM-systems GmbH), работающего на времяпролетной методике и составил 14 мкм. Распределение по размерам задавалось монодисперсным. На входе сопла задавался пуазелевский профиль скорости, соответствующий объемному расходу сухого воздуха 10,8 л/мин.

Результаты, полученные методом численного моделирования, согласуются с экспериментальными данными. Подтверждено предположение о равновесной концентрации паров спирта внутри сопла. В данной работе показано увеличение скорости распространения пламени для режима с добавлением дисперсной фазы по сравнению с чисто газовым пламенем при одинаковых полных массовых расходах спирта. Для режима с чисто газовым пламенем скорость распространения ламинарного пламени составила 20 см/с, что соответствует литературным данным. Для режима с добавлением дисперсной среды скорость распространения ламинарного пламени составила 42 см/с, что значительно превосходит скорость горения чисто газообразного спирта. При этом температура за фронтом пламени в обоих режимах соответствует значению для коэффициента избытка топлива 1,47 и составляет 2000 К.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант No 22-19-00803).
Использование инфраструктуры предоставлено в рамках государственного задания ИТ СО РАН.*

Список литературы

1. **Burgoyne J., Cohen L.** The effect of drop size on flame propagation in liquid aerosols // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences. 1954. Vol. 225, no. 1162. P. 375 – 392.
2. **Pera C., Reveillon J.** Direct numerical simulation of spray flame/acoustic interactions // Proceedings of the Combustion Institute. 2007. Vol. 31. No. 2. P. 2283 – 2290.

*A.A. Ponomarev¹, D.K. Sharaborin², M.Y. Hrebtov²,
R.I. Mulladzhanov², V.M. Dulin²*

¹ Novosibirsk State University,

Russia 630090 Novosibirsk, Pirogova, 2

² Institute of Thermophysics SB RAS,

Russia, 630090 Russia, pr Lavrentyeva, 1

NUMERICAL STUDY OF THE EFFECT OF INCREASING THE ETHANOL FLAME PROPAGATION RATE IN THE PRESENCE OF A DISPERSED PHASE

А.Г. Исламова¹, Д.В. Антонов¹, П.А. Стрижак¹

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634034, г. Томск, пр. Ленина, д. 30

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ С ПИРОЛИЗИРУЮЩЕЙСЯ ПОВЕРХНОСТЬЮ УГЛЯ

В последние десятилетия особое внимание уделяется изучению столкновения капель с металлическими и неорганическими поверхностями, характеризующимися различной шероховатостью. Изучение взаимодействия капель жидкостей с твердыми поверхностями важно не только с фундаментальной точки зрения, но также и является практически значимым в таких технологиях, как нанесение покрытий, капельное охлаждение, распыление топлива и др. Композиционные суспензионные топлива являются перспективной заменой углей и мазута с учетом экологических, экономических, энергетических и социальных критериев. В [1] предложена раздельная подача компонентов суспензионных топлив в камеру сгорания (капель воды и масла, частиц угля и биомассы). При раздельном вдуве компонентов топлива, например, в предтопочном пространстве за счет столкновения твердых частиц угля с каплями жидкости можно создавать многофазный газопарокапельный аэрозоль. Цель работы – установление основных закономерностей соударения капель воды с массивной поверхностью и мелкими частицами пиролизирующегося угля, а также изучение влияния выхода летучих на характеристики режимов взаимодействия.

Проведены экспериментальные исследования основных закономерностей соударения капель воды с прессованными таблетированными образцами в виде подложек и мелкими частицами пиролизирующегося твердого топлива. Определение характеристик столкновения капель дистиллированной воды с угольными таблетками и частицами проведены на установке с использованием теневого оптического метода [2]. Использовались образцы бурого угля. При изучении взаимодействия капель с подложками варьировался диаметр капель в диапазоне от 1 до 4 мм, а также их скорость движения – от 0,5 до 4 м/с. Это соответствовало диапазону варьирования числа Вебера $We = 7 - 830$. Температура поверхности угольных образцов варьировалась в диапазоне от 20 до 700 °С. На рис. 1 представлена карта режимов соударения капель воды с угольными подложками. Выделены режимы растекания (агломерации) и разделения при соударении капель с твердыми поверхностями в процессе химического реагирования и фазового перехода. Установлены отличия характеристик взаимодействия капель воды с частицами угля при варьировании их температуры.

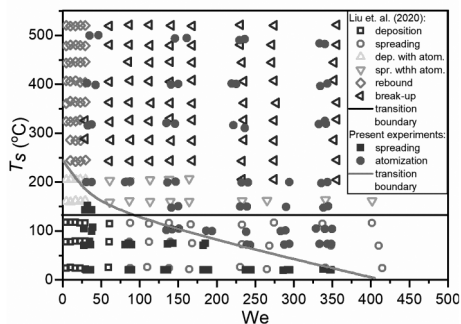


Рис. 1. Карта режимов соударения капель воды с угольными и кремниевыми [3] подложками

Построены карты режимов взаимодействия капель и частиц $B(We)$. Границы режимов столкновения описаны аппроксимационными кривыми. Обосновано, что при пиролизе угля выделение газообразных летучих не оказывает значительного влияния на режимы и характеристики разрушения капель в диапазоне исследуемых температур (20 – 700 °С). Соответственно, при прогностическом изучении характеристик этих процессов можно использовать математические модели без учета сложного комплекса фазовых превращений и химического реагирования.

Работа выполнена за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 21-71-10008, <https://rscf.ru/project/21-71-10008/>).

Список литературы

1. Increasing the efficiency of chemical looping combustion of biomass by a dual-stage fuel reactor design to reduce carbon capture costs / J. Haus, L. Lindmuller, L. Dymala, K. Jarolin, Y. Feng, E.U. Hartge, S. Heinrich, J. Werther // *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Chang.* 2020. Vol. 25. No. 6. P. 969 – 986.
2. Influence of roughness on polar and dispersed components of surface free energy and wettability properties of copper and steel surfaces / A.G. Islamova, E.G. Orlova, A.S. Ivashutenko, I.I. Shanenkov, I.Y. Zykov, D.V. Feoktistov // *Surf. Coatings Technol.* 2021. Vol. 422. P. 127518.
3. Liu L., Cai G., Tsai P.A. Drop Impact on Heated Nanostructures // *Langmuir*. 2020. Vol. 36. No. 34. P. 10051 – 10060.

A.G. Islamova¹, D.V. Antonov², P.A. Strizhak²

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
Russia 634034 Tomsk, Lenin Avenue, 30

LIQUID DROPLETS INTERACTION WITH PYROLYZING COAL SURFACE

Е.А. Карнозова¹, М.И. Муратов¹, Т.А. Кули-Заде¹, И.А. Знаменская¹,

*¹ МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет,
119234, г. Москва, Ленинские горы, д. 1. стр. 2*

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ И ПЛАЗМЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА СТЕНКИ КАНАЛА

Вопросы теплообмена при нагреве стенок газодинамического канала актуальны во многих практических приложениях. Подвод энергии может осуществляться как при нагреве стенок за счет тепловых потоков при ударно-волновых процессах, так и при внешнем подводе тепла – при инициировании химических, плазменных процессов. В этих случаях нагрев обтекаемой поверхности происходит через пограничный слой [1]. Импульсные – кратковременные – процессы с характерными временами энергоподвода менее характерных времен теплопроводности – приводят к кратковременному нагреву обтекаемой стенки и сносу области нагрева потоком. При этом время теплоподвода и форма обтекаемого профиля существенным образом влияют на время прогрева участка канала и соответственно – время его остывания.

В данной работе через кварцевые стенки канала рабочей секции, встроенной в камеру низкого давления однодиафрагменной ударной трубы с прямоугольным сечением 24x48 мм, исследовались тепловые поля, формирующиеся 1) при высокоскоростном обтекании диэлектрической вставки размерами 6x2x48 мм, установленной на нижней стенке канала; 2) при инициировании импульсного разряда в данном потоке за плоской ударной волной. Число Маха ударной волны $M = 2,8 - 4,0$. Регистрация теплового излучения проводилась с помощью высокоскоростной инфракрасной камеры Telops FAST M200 (рабочий диапазон 1,5 – 5,1 мкм, частота съемки до 2000 к/с, время экспозиции одного кадра варьировалось в диапазоне 200 – 1000 мкс). Локальный нагрев производился как за счет взаимодействия стенок канала с ударно-волновыми структурами потока, устанавливающимися вокруг препятствия, так и в результате взаимодействия стенок с плазмой разряда. Распределение тепловых полей меняется в зависимости от скорости набегающего потока и способа энергоподвода (рис. 1).

Было проведено сравнение времен релаксации теплового излучения участков поверхности стенки канала с препятствием в потоке за ударной волной. Большие диапазоны изменения теплофизических параметров газа в пограничном слое приводят к нагреву обтекаемых поверхностей: верхней и

нижней стенок, препятствия, боковых стенок (стекло). Тепловой поток от области наветренной стенки препятствия – зоны торможения в ударном слое при обтекании препятствия -сохраняется в течение 10-12 мс. При этом время сверхзвукового обтекания (энергоподвода) достигает 200 – 400 мкс.

При иницировании импульсного сильнооточного разряда в потоке за плоской ударной волной происходит перераспределение плазмы в зоны с пониженной плотностью в соответствии с изменением картины течения при обтекании потоком диэлектрического препятствия [2]. Время энергоподвода – до 2-3 мкс. В условиях потока с начальной скоростью 750 – 650 м/с тепловой поток регистрируется в зоне отрыва за обратным уступом в течение времени до 5 мс.

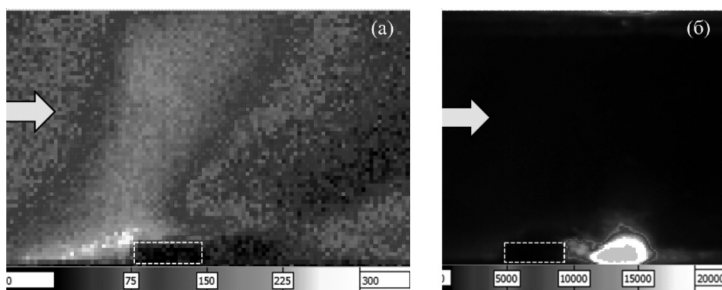


Рис. 1. Распределение теплового излучения в результате (а) дифракции падающей ударной волны на прямоугольном препятствии в канале (б) взаимодействия с наносекундной плазмой импульсного поверхностного разряда

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 22-29-00652.

Список литературы

1. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое / С.С. Куталадзе, А.И. Леонтьев / М.: Энергоиздат., 1985. 320 с.
2. Знаменская И.А., Татаренкова Д.И., Кули-Заде Т.А. Наносекундная ионизация области обтекания прямоугольного уступа высокоскоростным потоком // Письма в ЖТФ. 2020. Т. 46, вып. 1. С. 5 – 7.

E.A. Karnozova¹, M.I. Muratov¹, T.A. Kuli-Zade¹, I.A. Znamenskaya¹

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics,
Russia 119234 Moscow, Leninskie Gory, 1-2

NON-STATIONARY HEAT FLOWS INVESTIGATION UNDER SHOCK-WAVE AND PLASMA INFLUENCE ON CHANNEL

А.В. Павлов, Н.Е. Кикоть, П.Г. Бобылев, С.З. Сапожников
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ МОДЕЛИ НА ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ НЕДОГРЕТОЙ ВОДЫ НА ПЕРЕГРЕТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Преобладающее количество экспериментов, связанных с изучением теплообмена при кипении, основано на термометрии [1] и высокоскоростной визуализации [2]. Что не позволяет комплексно исследовать кипение и его режимы [3].

Изучение теплообмена при кипении на шаре исключало влияния концевых эффектов модели. Следующим шагом стало создание цилиндрической модели и оценка того, как влияет форма модели на характер кипения и критическую плотность теплового потока (ПТП).

Цилиндр выполнен из титана ВТ22 с диаметром основания 34 мм (как и у шарообразной модели) и высотой 22,3 мм, выбранной с учетом соответствия масс обеих моделей [3]. Гетерогенный градиентный датчик теплового потока (ГГДТП) медь+никель установлен в центре верхнего торца цилиндра заподлицо, для чего выфрезерована выборка размерами $5 \times 5 \times 0,6$ мм с двумя отверстиями диаметром $d = 1,6$ мм, под изолирующие керамические трубки. Рядом с датчиком расположена термопара для определения его температуры. Размеры выборки обеспечивают монтаж датчика размерами $3 \times 3 \times 0,45$ мм (рис. 1).

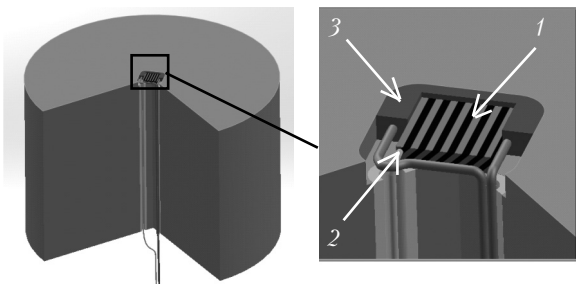


Рис. 1 Модель цилиндра с ГГДТП:
1 – ГГДТП;
2 – термопарный провод;
3 – высокотемпературный коаунд

Цилиндрическая модель помещается в проходную печь и фиксируются в ней державкой. Показания с ГГДТП и термопары поступают на измерительно-вычислительный комплекс модели NIPXI-1050 с частотой записи 5000 измерений / с. Температура воды отслеживалась с помощью мультиметра

Fluke 289 с термопарой, а поддержание необходимой температуры воды осуществлялось омическим нагревателем [3].

Сравнение результатов эксперимента на двух моделях показало, что время остывания модели значительно снизилось. Критическая ПТП, соответствующая максимальному значению для каждого графика, одинакова. Результаты для цилиндрической модели (а) и для шаровой (б) представлены на рис. 2.

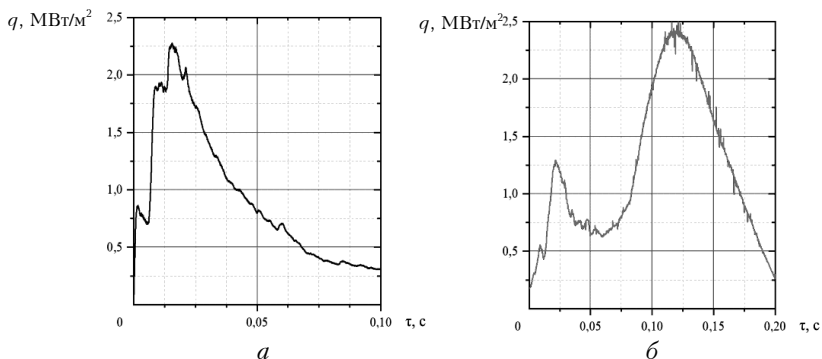


Рис. 2 Графики зависимости теплового потока от времени:
а – для цилиндра; б – шара

Эксперименты позволяют считать, что форма модели не влияет на значения критической ПТП, а сказывается только на времени и характере переходного и пленочного режимов.

Работа поддержана грантом РФФ № 22-29-00160.

Список литературы

1. **Забиров А.Р.** Исследование процессов теплообмена при охлаждении высокотемпературных тел в недогретых жидкостях. М., 2016. 22 с.
2. **Ягов В.В.** Нестационарный теплообмен при пленочном кипении недогретой жидкости / В.В. Ягов, А.Р. Забиров, М.А. Лексин // Теплоэнергетика. 2015. Т. 2015, № 11. С. 70 – 80.
3. **Сапожников С.З. и др.** Исследование кипения на поверхности шара методом градиентной теплотометрии // Тепловые процессы в технике. 2021. Т. 13, № 10. С. 434 – 441.

A.V. Pavlov, N.E. Kikot, P.G. Bobilev, S.Z. Sapozhnikov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Russia 195251, St.Petersburg, Polytechnicheskaya, 29

INFLUENCE OF THE MODEL SHAPE ON HEAT TRANSFER WHEN BOILING SUBCOOLED WATER ON A OVERHEATED SURFACE

А.Д. Букреева, В.А. Грабежная

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации
Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского»
249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1*

КРИЗИС ТЕПЛООБМЕНА В ПАРОГЕНЕРИРУЮЩЕЙ ТРУБЕ ПРИ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ

В настоящее время в ряде стран мирового сообщества (Россия, Индия, Южная Корея, Япония) ведутся разработки проектов АЭС нового поколения, в которых в качестве парогенератора (ПГ) рассматриваются прямотрубные ПГ корпусного типа, в которых отсутствует разделение на испаритель и пароперегреватель.

Известно, что в любом парогенерирующем канале с перегретым паром имеет место кризис теплообмена. Принято считать, что при давлении свыше 17 МПа – это кризис 1-го рода, при меньших давлениях может возникать как кризис 1-го, так и 2-го рода [1].

Последние скелетные таблицы, приведенные в [1], включают все имеющиеся данные по критическим тепловым потокам, полученные при электрообогреве. В [2] было показано, что кризис теплообмена не зависит от способа обогрева.

В [3] сообщается о гидродинамической неустойчивости в режимах с кризисом 1-го рода. Однако при низких давлениях с массовой скоростью при кризисе 2-го рода, как видно из рис. 1 из [3], наблюдается смещение профиля температуры корпуса во времени (начало и конец опыта) в зоне развитого кипения и кризиса теплообмена, что говорит о теплогидравлической неустойчивости (ТГН), хотя циклических колебаний расхода в [3] отмечено не было.

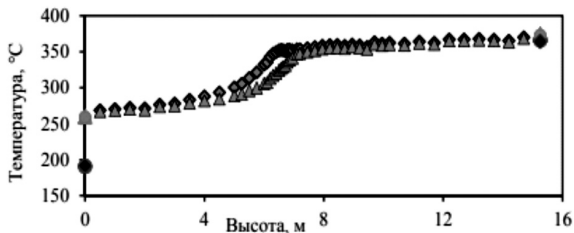


Рис. 1. Распределение температуры адиабатной стенки по длине модели [3]

◆ – начало опыта;
▲ – конец опыта

*А.Д. Букреева, adbukreeva@ippe.ru

Однако, оценки, приведенные по критерию П.А. Петрова, показывают, что

$$\frac{\Delta P_3}{\Delta P_{\text{исп}} + \Delta P_{\text{пер}}} < 1.$$

В этих режимах отмечено и снижение экспериментальных данных о $x_{\text{гр}}$ по сравнению с расчетами для всей области измерения давления (6,0 ÷ 16 МПа), рис. 2.

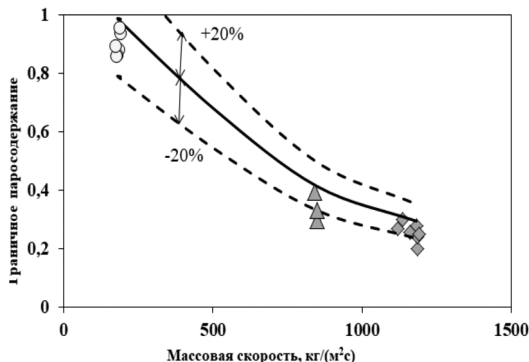


Рис. 2. Сравнение опытных данных о граничном паросодержании с расчетами [3].

Давление:
 ○ – 6 МПа;
 ▲ – 14 МПа;
 ◆ – 17-18 МПа

В настоящее время рекомендаций по расчету кризиса теплообмена в условиях ТГН отсутствуют.

Список литературы

1. Кириллов П.Л., Бобков В.П., Жуков А.В., Юрьев Ю.С. Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике. Том 1. Теплогидравлические процессы в ЯЭУ. М.: ИздАт, 2010. 776 с.
2. Кириллов П.Л., Грабежная В.А. О влиянии способа обогрева на критический тепловой поток // Атомная энергия. 1981. Т. 51 Вып. 4(10). С. 225 – 227.
3. Грабежная В.А., Михеев А.С. К вопросу о теплогидравлической неустойчивости в парогенерирующих каналах, обогреваемых жидким металлом. ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы, 2022, вып. 1. С. 230 – 244.

A.D. Bukreeva, V.A. Grabezhnaya

State Scientific Centre of the Russian Federation – Leypunsky Institute
 for Physics and Power Engineering,
 249033, Obninsk, Bondarenko, 1

**DNB AND DRYOUT IN ONCE-THROUGH STEAM GENERATING
 TUBE UNDER THERMAL-HYDRAULIC INSTABILITY**

С.М. Волков¹, А.И. Светонос¹, П.Д. Лобанов, ¹ Н.А. Прибатурин¹

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В МОДЕЛИ ТВС С ТВЭЛОМ КРЕСТООБРАЗНОЙ ГЕОМЕТРИИ

На сегодняшний день атомная энергетика занимает более 15 % общемирового производства энергии. В связи с этим, в современном мире особенно актуальной становится задача обеспечения безопасной работы атомных энергетических установок. Не менее важной является задача увеличения эффективности РУ. Для решения этих задач необходимо осуществлять моделирование гидродинамики теплоносителя в активной зоне реактора, которое в свою очередь нуждается в верификации на экспериментальных данных. В связи с этим, актуальным является проведение модельных экспериментов по исследованию локальной гидродинамики внутри активной зоны.

Целью данной работы является проведение экспериментального исследования локальной гидродинамики потока модельного теплоносителя в модели ТВС с твэлом крестообразной геометрии (рис. 1).

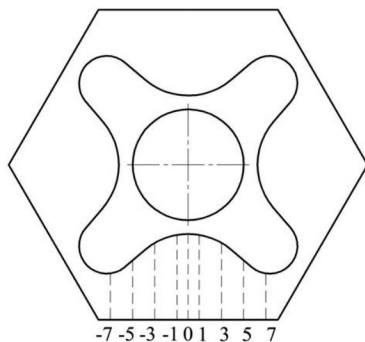


Рис. 1. Крестообразная модель имитатора твэла

В работе были получены распределения осевой скорости и пульсаций скорости в нисходящем однофазном и двухфазном потоках, при обтекании вертикальной модели крестообразного твэла. Горизонтальные профили скорости были получены для вариаций объёмного расхода жидкости $Q = 12, 15, 18 \text{ м}^3/\text{ч}$. При измерениях в двухфазном потоке относительные газосодержа-

ния составляли $\beta = 0,01-0,06$. Также в работе были получены распределения локального газосодержания для $\beta = 0,02$ и $Q = 12, 15, 18 \text{ м}^3/\text{ч}$. В качестве метода измерения скорости использовался метод Лазерной Доплеровской Анемометрии (ЛДА). Для определения локального газосодержания использовался прямоточный оптический метод, включающий съёмку с малой глубиной резкости.

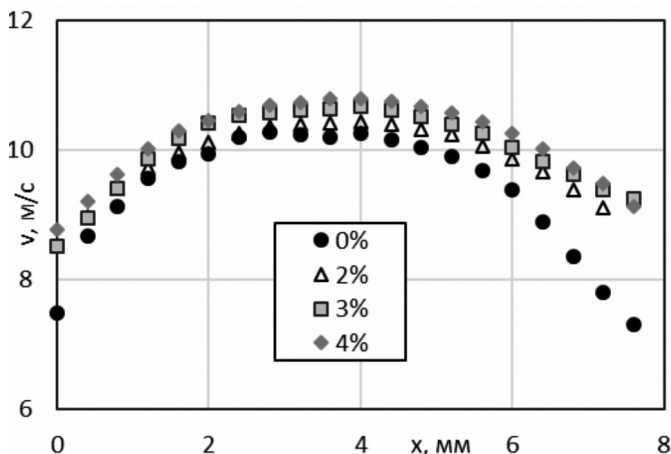


Рис. 2. Профили средней осевой скорости $Q=12 \text{ м}^3/\text{ч}$, при различном относительном газосодержании

Список литературы

1. Xiong J., Lu C., Qu W. Validation for CFD Simulation in Rod Bundles With Split-Vane Spacer Grids Based on LDA Measurement // *Frontiers in Energy Research*. 2020. Т. 8. С. 43.
2. Nguyen T. et al. High-fidelity velocity measurements in a totally blocked interior subchannel of a wire-wrapped 61-pin hexagonal fuel bundle // *Nuclear Engineering and Design*. 2019. Т. 353. С. 110234.

S.M. Volkov¹, A.I. Svetonosov¹, P.D. Lobanov¹, N.A. Pribaturin¹

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

EXPERIMENTAL RESEARCH OF LOCAL HYDRODYNAMIC PARAMETERS IN A MODEL OF FUEL ASSEMBLY WITH THE FUEL ROD CROSS-SHAPED GEOMETRY

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК
КОЛЬЦЕВОЙ АСИММЕТРИЧНОЙ НЕДОРАСШИРЕННОЙ
СТРУИ**

В работе исследованы характеристики кольцевой асимметричной недорасширенной струи, истекающей из тонкого щелевого канала. С учетом пространственных масштабов и характерных параметров течения, они классифицируются как микроструи [1]. Протяженный в продольном направлении кольцевой канал образован в результате консольного закрепления тонкостенного тела цилиндрической формы по оси трубы. Условия крепления и эксплуатации не могут обеспечить полного совпадения осей названных объектов, поэтому возникающий эксцентриситет приводит к ситуации, когда в окружающем направлении истечение газа происходит из разной по высоте щели.

Описанная конструкция для формирования направленного газового потока служит для управления транспортом заряженных капель, возникающих в результате электрического распыления жидкости. С учетом того, что заряженные капли дрейфуют по линиям направления электрического поля, целесообразна организация газодинамического воздействия, обеспечивающего отклонение направления движения в сторону приемного устройства. Подобные конструкции находят применение в химической и авиационной промышленности.

Решение задачи получено в рамках численного интегрирования системы уравнений Навье–Стокса в нестационарной постановке. Уравнения Навье–Стокса, осредненные по Рейнольдсу, решались для ламинарного режима течения в капилляре и турбулентного, с моделью турбулентности $k-\epsilon$ SST, для кольцевой струи. Для дискретизации задачи по пространству использован метод контрольного объема. Расчетная сетка состояла из $2 \cdot 10^6$ ячеек. Схема интегрирования имела второй порядок точности по времени и второй порядок аппроксимации по пространству на гладких решениях. Монотонность поведения функций обеспечивалась при помощи TVD-подхода при определении значения функций на гранях контрольного объема.

В окрестности источника, из-за разности статических давлений внутри кольцевой струи и снаружи, возникают радиальные компоненты скорости. В результате этого происходит поджатие струи к оси. При смыкании слоев

смещения возникает область конусообразной формы, в которой происходит циркуляционное течение [2]. На определенных режимах наличие обратных токов возбуждает акустические колебания [3].

На рис. 1(1) приведены линии равного значения числа Маха для двух полуплоскостей ZX и ZY. На рис. 1(2) представлено сечение кольцевой струи в значениях её наибольшего эксцентриситета.

По результатам исследований можно сделать вывод о том, что окружающая неравновесность при формировании кольцевой струи приводит к появлению радиальной компоненты импульса.

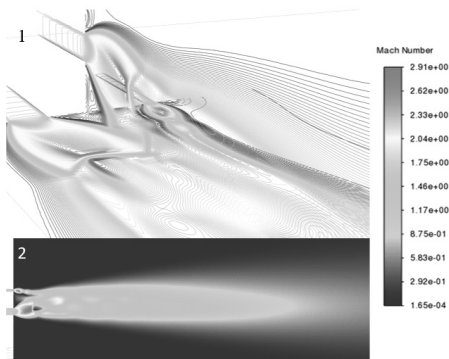


Рис. 1. Распределение числа Маха:
1 — изометрическая картина;
2 — в плоскости симметрии струи

Список литературы

1. Численное моделирование недорасширенных осесимметричных микроструй, истекающих в затопленное пространство / В.М. Анискин, Т.А. Коротаева, Е.А. Ободовская, А.О. Турчинович // Доклады АН ВШ РФ. 2018. № 1 (38). С. 22 – 35. doi: 10.17212/1727-2769-2018-1-22-35
2. Донное давление: сборник научных статей Международного научного подразделения Университета ИТМО «Механики и энергетических систем» / ЦГТ «КУЛОН»; БГТУ «ВОЕНМЕХ»; Университет ИТМО; под редакцией П.В. Булата. Краснодар: Издательский Дом – Юг, 2016. 196 с.
3. **Римский-Корсаков А.В., Седельников Т.Х., Семенов А.Г.** Автоколебания кольцевой газовой струи // Отчет Акустического института. М., 1975.

S.V. Bulovich, A.A. Vasilev

Peter The Great Saint-Petersburg Polytechnic University,
Russia 195251 Saint-Petersburg, Politekhnicheskaya, 29

**MATHEMATICAL MODELING OF THE CHARACTERISTICS
OF AN ANNULAR ASYMMETRIC UNDEREXPANDED JET**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА
ЗАРЯЖЕННЫХ МИКРОКАПЕЛЬ В СПЛОШНОЙ СРЕДЕ**

Наделение зарядом капли вещества уже находило применение в ряде технологических приложений в различных сферах, таких как организация струйной и 3D-печати [1], система доставки лекарств [2]. Для создания подобных устройств необходимо иметь более полные представления о движении заряженных микрокапель в электрическом и газодинамическом полях.

В данной работе рассматривается задача переноса счетного количества заряженных микрокапель в сплошной среде, движение которых определяется суперпозицией силы Кулона и силы Стокса. Газодинамическую структуру потока формирует кольцевая струя, истекающая из капилляра, а электрическое поле получается из разности потенциалов на капилляре и транспортном противоэлектроде. В случае неподвижной газовой среды распыляемые с электрода заряженные капли образовали бы облако, которое осаждалось бы на противоэлектроде со скоростью дрейфа. При помощи газового потока траектория движения капель в электрическом поле может быть изменена и направлена на приемное устройство.

Для получения картины течения решались осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса в нестационарной, осесимметричной постановке при помощи $k-\epsilon$ SST модели турбулентности. Дискретизация по времени и пространству осуществлялась со вторым порядком точности. Система уравнений Максвелла сводилась к решению уравнения для потенциала. Состояние дискретной среды описывалось в Лагранжевом подходе. Расчетная сетка состояла из $6 \cdot 10^4$ ячеек. Численное моделирование выполнено с помощью программного пакета ANSYS Fluent.

Кольцевой струйный поток газа сформирован при помощи разницы давления на входе в капилляр и атмосферного давления, которая была равна $\Delta p = 6, 4, 2, 1$ атм. Температура газа на входе в капилляр – 20°C . Начальная скорость движения частиц – 12 м/с. Заряд частиц постоянен и равен $5,4 \cdot 10^{-13}$ Кл. Диаметр частиц принят равным 30 мкм. В зависимости от режима количество моделируемых капель колебалось в диапазоне от $6 \cdot 10^3$ до $2 \cdot 10^4$ штук.

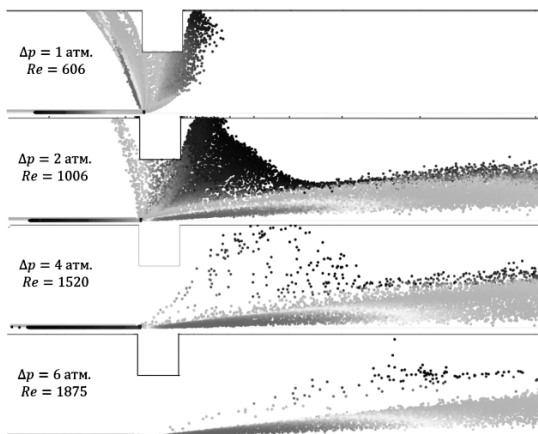


Рис. 1. Картина распространения частиц в момент времени $t = 0,003$ с

На рис. 1 представлена картина распространения частиц в момент времени $t = 0,003$ с. Цветом обозначено относительное значение модуля скорости капель.

В первом случае при $\Delta p = 1$ атм частицы под действием силы Кулона осаждаются на транспортном противоэлектроде, при этом влияние газового потока оказывается несущественным. При $\Delta p = 2$ атм присутствует значительная доля частиц, по-прежнему осаждающаяся на электрод. Для остальных рассмотренных случаев воздействие сил Стокса оказывается достаточным, чтобы изменить траекторию движения заряженных капель.

Список литературы

1. **Taylor A.P. & Velasquez-Garcia L.F.** (2015). Electrospray printed nanostructured graphene oxide gas sensors. *Nanotechnology*, 26, Article 505301 <http://dx.doi.org/10.1088/0957-4484/26/50/505301>;
2. **Steipel R.T., Gallovic M.D., Batty C.J., Bachelder E.M. & Ainslie K.M.** (2019). Electrospray for generation of drug delivery and vaccine particles applied in vitro and in vivo. *Materials Science & Engineering: C, Materials for Biological Applications*, 105, Article 1110070 <http://dx.doi.org/10.1016/j.msec.2019.1110070>.

A.A. Vasilev, S.V. Bulovich

Peter The Great Saint-Petersburg Polytechnic University,
Russia 195251 Saint-Petersburg, Politekhnicheskaya, 29

**MATHEMATICAL SIMULATION OF THE TRANSFER
OF CHARGED MICRODROPS IN A CONTINUOUS MEDIUM**

С.С. Попович, Ю.А. Виноградов, А.Г. Здитовец

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова,
119192, г. Москва, Мичуринский пр., д. 1*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОГИДРОДИНАМИКИ ТЕЧЕНИЯ ВОЗДУШНО-КАПЕЛЬНОГО ПОТОКА В ПЛОСКОМ СВЕРХЗВУКОВОМ СОПЛЕ

Известно, что при расширении исходно сжатого газа в канале его термодинамическая температура снижается за счет перехода внутренней энергии газа в кинетическую энергию потока. Возникает вопрос: возможно ли создать в потоке такие условия, при которых температура обтекаемой стенки была бы близка к минимальной температуре в системе – термодинамической температуре потока. Решение данной задачи возможно через использование свойств газокapelных потоков с малой массовой концентрацией (до 1%) жидкой фазы. В таком случае жидкая фаза практически не влияет на свойства несущего потока, при этом капли могут охлаждаться до термодинамической температуры потока [1]. Организовав выпадение охлажденных капель на стенку, возможно добиться снижения температуры ее поверхности.

Проведены экспериментальные исследования течения воздушно-капельного потока в плоском сверхзвуковом сопле аэродинамической установки. Капли подавались в поток с помощью центробежной форсунки мелкодисперсного распыла. Начальная концентрация дисперсной (жидкой) фазы в потоке и начальное распределение размеров капель варьировались изменением перепада давления на форсунке. При исследовании распределения капель по размерам в сверхзвуковом потоке использовался теневой лазерный метод SSP (shadow photography) [3], включающий в себя: систему освещения потока на основе двойного импульсного Nd:YAG лазера Beamtech с длиной волны 532 нм, цифровую ПЗС-камеру с кадровой частотой на полном разрешении до 15 Гц и синхронизирующий процессор Polis SP-10.0ПС.

Методом SSP установлен среднезаутеровский диаметр капель в сверхзвуковом потоке и в расширяющейся части сопла ≈ 20 мкм. Средний диаметр капель мало меняется по длине сопла, при изменении перепада давления на форсунке от 300 до 1280 кПа (рис. 1) и числа Маха в диапазоне от 2.0 до 3.0.

* С.С. Попович, pss@imec.msu.ru

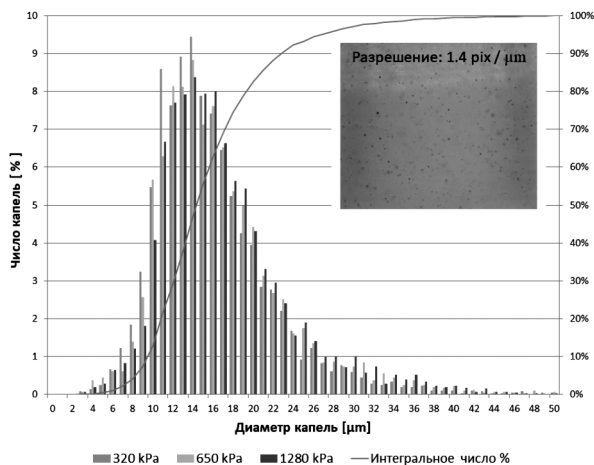


Рис. 1. Сравнение диаметра капель при изменении перепада давления на форсунке

Исследования проводятся при поддержке гранта РФФ (проект №19-19-00234).

Список литературы

1. Леонтьев А.И., Осипцов А.Н., Рыбдылова О.Д. Пограничный слой на плоской пластине в сверхзвуковом газокapельном потоке. Влияние испаряющихся капель на температуру адиабатической стенки // ТВТ. 2015. Т. 53. № 6. С. 910 – 917.
2. Попович С.С., Здитовец А.Г., Киселёв Н.А., Виноградов Ю.А., Медвещкая Н.В. Измерение адиабатной температуры стенки плоской пластины, обтекаемой сверхзвуковым воздушно-капельным потоком // Изв. РАН. МЖТ. 2020. № 5. С. 130 – 136.
3. Попович С.С., Леонтьев А.И., Здитовец А.Г., Киселёв Н.А., Виноградов Ю.А. Экспериментальное исследование обтекания пластины сверхзвуковым потоком воздуха с примесью мелкодисперсных водных // Материалы Восьмой Российской национальной конференции по теплообмену. Т. 1. Изд-во МЭИ Москва, 2022. С. 428 – 431.

S.S. Popovich, Y.A. Vinogradov, A.G. Zditovets

Institute of Mechanics of Lomonosov Moscow State University,
Russia, 119192, Moscow, Michurinsky pr. 1

**EXPERIMENTAL STUDY OF THE AEROHYDRODYNAMICS
OF AN AIR-DROPLET FLOW IN A PLANE SUPERSONIC NOZZLE**

Е.А. Евко, Ю.Ю. Пузина, И.А. Ячевский

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ГЕЛИЯ-II В U-ОБРАЗНОМ КАНАЛЕ

Сверхтекучий гелий используется в различных исследованиях для криостатирования оборудования на ультранизком уровне температур. Для изучения процессов теплопереноса в гелии II проводятся эксперименты в каналах различного диаметра, в том числе с использованием пористых наполнителей. Ранее показано [1], что в капилляре большой длины сверхтекучий гелий, в отличие от классических жидкостей, может двигаться в сторону нагревателя.

В настоящей работе представлена экспериментальная система, в которой в автоматическом режиме вместе с видеозаписью происходит фиксация параметров процессов внутри криостата: нагрузки нагревателя, давления паров над свободной поверхностью жидкости [2]. В эту систему входит ячейка (рис. 1), которая представляет собой U-образную хлоркальциевую трубку внутренним диаметром 16 мм и длиной 170 мм. В один из концов трубки вставлен нагреватель. Он выполнен из медного диска диаметром 11 мм, под поверхностью которого располагается спираль из нихромовой проволоки диаметром 50 мкм. Такая конструкция позволяет получить равномерный тепловой поток, направленный вдоль оси канала. Диск запрессован в пробку из фторопласта, которая в свою очередь вставляется в верхний патрубок U-образной трубки враспор. Вся сборка дополнительно обрабатывается герметизирующим клеем для предотвращения утечек сверхтекучего гелия. Трубка с помощью держателей крепится к штоку и располагается на определенной глубине внутри криостата, заполненного жидким гелием.

На данном этапе эксперименты проводились в пустом канале (без засыпки). Всего проведено 13 экспериментальных серий со стационарной тепловой нагрузкой от 0.3 Вт до 1,5 Вт и температурой жидкости в пределах от 1.4К до 2.17К (I-точка). Для определенного сочетания параметров (температура жидкости, тепловой поток с нагревателя, глубина погружения) при включении нагрузки на греющей поверхности образуется пар, который заполняет всё поперечное сечение канала. Эта паровая пробка увеличивается в размерах, т.е. межфазная поверхность начинает двигаться вниз. Достигнув некоторого положения, она останавливается и начинает двигаться вверх вплоть до столкнове-

ния жидкости с нагревателем, и процесс повторяется. Таким образом, обнаружены вертикальные колебания границы раздела фаз пар - He-II в канале, причем их амплитуда может превышать расстояние до поворота канала. На рис. 2 представлен пример обработки видеозаписи для серии, в которой амплитуда колебаний около 50 мм и частота 3 Гц. Во время эксперимента при росте температуры гелия наблюдалось уменьшение амплитуды колебаний.

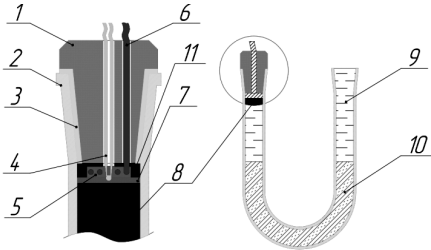


Рис. 1. Конструкция экспериментальной ячейки:
 1 — пробка; 2 — стенка; 3 — эпоксидная смола; 4 — термопара; 5 — термопаста; 6 — линия нагревателя; 7 — медный диск; 8 — паровая пленка; 9 — жидкость; 10 — засыпка; 11 — керамическая подложка

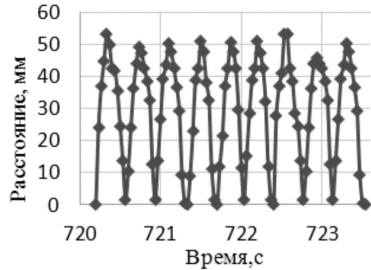


Рис. 2. Колебания межфазной поверхности внутри пустого канала

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект №23-29-00342).

Список литературы

1. **Королев П.В., Крюков А.П., Медников А.Ф.** Экспериментальное исследование движения гелия-II в капилляре при наличии паровой полости вблизи нагревателя // Вестник МЭИ. 2006. № 4. С. 27 – 33.
2. **Володин И.В., Корняков И.А., Ячевский И.А.** Автоматизация экспериментального стенда по исследованию кипения сверхтекучего гелия // Материалы VI Международной научно-практической конференции «Информатизация инженерного образования» 12-15 апреля 2022г. М.: Издательство МЭИ. С. 64 – 68.

E.A. Evko, Yu. Yu. Puzina, I.A. Yachevsky

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,
 Russia, 111250 Moscow, Krasnokazarmennaya, 14

RESEARCH OF THE HELIUM-II DYNAMICS IN THE U- SHAPED CHANNEL

Ю.А. Дементьев¹, Ф.В. Роньшин¹, Е.А. Чиннов¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, д. 1*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В ПЛОСКОМ МИКРОКАНАЛЕ ПРИ ТЕЧЕНИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ И ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ

Использование двухфазных систем в микроканалах особо актуально при охлаждении оборудования со сверхинтенсивным тепловыделением, поскольку при фазовых превращениях теплоотдача может значительно улучшаться. Опубликовано большое число работ, посвященных способам интенсификации теплообмена в двухфазных системах (кипение на структурированных поверхностях [1], пленочные течения применение аддитивных элементов). Разрабатываются новые виды поверхностей, изучаются и модифицируются различные геометрии каналов. Применение плоской геометрии каналов (прямоугольные каналы с большим соотношением сторон) перспективно для разработки систем охлаждения 3D-микрочипов с объемным тепловыделением, поскольку характерные размеры тепловыделяющих поверхностей чипов совпадают с характерными размерами плоских микроканалов. Более того, в современных системах охлаждения длины каналов весьма ограничены. Для оптимизации теплоотводящих устройств необходимо понимание механизмов формирования режимов двухфазных течений как в адиабатном случае, так и в условиях локального нагрева, знание гидравлических и локальных характеристик двухфазных течений. Знания о формировании газожидкостных течений в адиабатном случае актуальны, поскольку морфология двухфазного потока с нагревом схожа с адиабатным при одинаковых содержаниях паровой/газовой фазы.

Данная работа посвящена изучению характеристик газожидкостного течения в условиях локального нагрева в микроканале высотой 55 мкм и шириной 10 мм. С помощью оптической шлирен системы зарегистрированы следующие режимы течения: струйный, снарядный, вспененный, кольцевой, переходной, осушенный. Показано, что с увеличением теплового с 0 до 2 Вт/см² область снарядного течения возрастает, переходная зона уменьшается. Границы режимов на картах для 2 и 5 Вт/см² практически не меняются. При увеличении теплового потока на всех режимных картах область струйного режима переходит в осушенную область.

*Ю.А. Дементьев, demyurij@inbox.ru

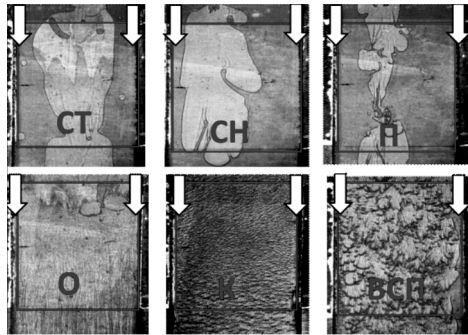


Рис. 1. Режимы течения в микроканале $0,055 \times 10 \text{ мм}^2$ в адиабатном случае.
 Режимы течения: СТ-струйный, СН-снарядный, П-переходной,
 О-осушенный, К-кольцевой, ВСП-вспененный

Впервые исследовано влияние массовой скорости газа на коэффициент теплоотдачи. Показано, что для теплового потока 2 Вт/см^2 коэффициент теплоотдачи возрастает за счёт увеличения площади испарения при увеличении массовой скорости газа. Для теплового потока 5 Вт/см^2 при увеличении массовой скорости газа сначала наблюдается ухудшение теплоотдачи за счет осушения плёнки жидкости и образования сухих пятен, затем наблюдается рост теплоотдачи во всем диапазоне массовых скоростей, когда сухие пятна замываются. Максимальная теплоотдача достигается в кольцевом режиме течения.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФ № 22-19-20090 (<https://rscf.ru/project/22-19-20090/>) и Правительства Новосибирской области, соглашение № р-13.

Список литературы

1. Khmel S., Baranov E., Vladimirov V., Safonov A., Chinnov E. Experimental study of pool boiling on heaters with nanomodified surfaces under saturation // Heat Transfer Engineering. 2022. Vol. 43. №. 20. P. 1724 – 1742.

Yu.A. Dementyev¹, F.V. Ronshin¹, E.A. Chinnov¹

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics,
 1 Acad. Lavrentiev ave., Novosibirsk, Russia

THE EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HYDRDYNAMICS AND HEAT TRANSFER DIELECTRIC LIQUID AND GAS-VAPOR MIXTURE IN SLIT MICROCHANNEL

А.В. Тупотилова, А.В. Беляев, А.В. Дедов

Московский энергетический институт,
111116, г. Москва, ул. Красноказарменная, 17А*

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕННЫХ УСТРОЙСТВ ПРИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ

Работа посвящена экспериментальному исследованию гидродинамики и теплообмена в модельных теплопередающих устройствах с модифицированными поверхностями теплообмена.

Ранее были разработаны и апробированы методы увеличения теплоотдачи и критических тепловых потоков при кипении за счет модификации поверхности в условиях большого объема [1] и в каналах малого диаметра [2]. Использование развитых структур поверхностей теплообмена ведет к уменьшению размеров теплообменных устройств. Необходима разработка новых эффективных технологий модификации поверхностей теплообмена и их апробация на моделях теплопередающих устройств для последующего внедрения в промышленность.

Для экспериментальных исследований был модернизирован стенд, применяемый для исследования теплообмена в каналах. Сконструирован рабочий участок в виде модели пластинчатого теплообменника, представляющей собой два прямоугольных канала $ШГВ = 8г3,8$ мм, разделенных пластиной из нержавеющей стали толщиной 0,4 мм. В одном канале протекала дистиллированная вода заданной температуры, во втором канале в том же направлении циркулировал кипящий поток. Вода была охлаждаемой жидкостью, а нагреваемой были фреоны RC318 и R125 при приведенных давлениях $p_r = 0,132$ и $p_r = 0,43$ соответственно. Тепловой поток от воды передается через тонкую пластинку к фреону, в канале с хладагентом начинается процесс кипения.

Тестовая серия экспериментов выполнена на немодифицированной поверхности с целью отработки методов измерений и проверки работоспособности разработанного участка с целью дальнейшего использования рабочих участков с модифицированной поверхностью.

На рис. 1 представлены результаты обработки экспериментальных данных полученных на немодифицированной поверхности в виде зависимости теплового потока от массовой скорости фреонов RC318 и R125 при двух приведенных давлениях.

*А.В. Тупотилова, StupakovaAV@mpei.ru

По графику зависимости Q от $g\omega$ сделаны следующие выводы: с ростом массовой скорости рабочей жидкости тепловой поток сначала растет, а потом выходит на некоторое «плато», т.е. изменяется незначительно; с увеличением приведенного давления тепловой поток больше при одинаковых расходах рабочей жидкости.

Для дальнейшего изучения теплообмена в каналах в потоке кипящей жидкости на развитых поверхностях, изготовлены несколько рабочих участков: один с поверхностью теплообмена подверженной плазменной обработке; три с поверхностью теплообмена, обработанной лазером при разных режимах. В докладе представлены результаты проведенных экспериментов.

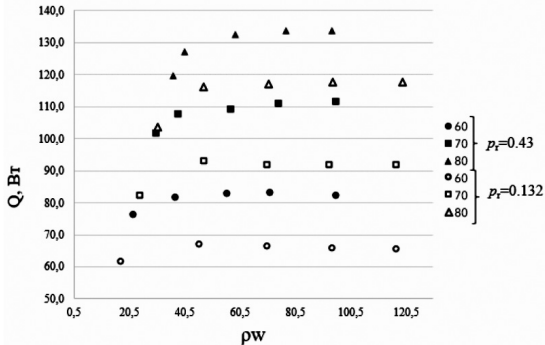


Рис. 1. Зависимость теплового потока от массовой скорости фреонов RC318 и R125

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-19-00410.

Список литературы

1. Dedov A.V., Khaziev I.A., Laharev D.A., Fedorovich S.D. Study of Nucleate Pool Boiling Heat Transfer Enhancement on Surfaces Modified by Beam Technologies, Int. Heat Transfer Engineering 43(7) (2022) 598– 607.
2. Belyaev A.V., Dedov A.V., Sidelnikov N.E., Jiang P., Varava P., Xu R. Flow Boiling Heat Transfer Intensification Due to Inner Surface Modification in Circular Mini-Channel, Int. Water 14(24) (2022) 4054.

A. V. Tupotilova, A. V. Belyaev, A. V. Dedov
 Moscow Power Engineering Institute,
 Russia, 111116, Moscow, Krasnokazarmennaya, 17A

IMPROVING THE EFFICIENCY OF HEAT EXCHANGE DEVICES AT PHASE TRANSITIONS

И.И. Саушин

Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр
Российской академии наук»,
420111, г. Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31

КРИТЕРИЙ ОБРАЗОВАНИЯ И РАСПАДА СТРУИ РЕЛЕЯ ПРИ УДАРЕ КАПЛИ О ЖИДКОСТЬ С ЖИДКОЙ ПЛЕНКОЙ

Несмотря на свои малые масштабы, задача об ударе капли о поверхность жидкости или твердой поверхности имеет важное значение во многих научных и технических приложениях: аэрозольное охлаждение или покраска, термическое напыление, сепарация жидкости из газа, струйная печать, судебно-медицинская практика. При определенных условиях в результате удара капли о поверхность во внешнюю газовую среду выбрасываются единичные или множественные вторичные капли меньшего диаметра, которые могут вызывать существенные проблемы. Например, в газо-жидкостных сепараторах эти вторичные капли с меньшим числом Фруда (Fr) могут быть унесены динамическим напором очищенного газа, снижая эффективность сепарации. В задачах струйной печати это снижает точность нанесения краски. Механические свойства термически напыленного покрытия также сильно зависят от кинематики удара капли. По этой причине основной упор в подобных задачах сделан на определения критерий выброса вторичных капель в газовую среду, образования кратеров или так называемых корон.

К настоящему моменту времени для каждого класса на основе экспериментальных и численных исследований получены достаточно подробные карты режимов удара в координатах безразмерных числовых комплексов подбоя. Эти результаты легли в основу инженерных нормативных рекомендаций при проектировании технических изделий, следуя которым для предотвращения образования брызг иногда приходится вынужденно снижать диаметр или скорость падающей капли, что искусственно занижает потенциальные характеристики оборудования. Для повышения или понижения порогового уровня критерия разбрызгивания может использоваться метод изменения давления газовой среды. Очевидно, что это возможно лишь для герметичных систем, например, камеры сепаратора.

Последствия удара, а соответственно и условия появления брызг, существенно меняются если рассматривать несмешивающиеся капельную и целевую жидкости, например, нефть и воду. Однако в литературе представлено крайне мало подобных исследований. Более того, в этих исследованиях вни-

мание уделено больше межфазной динамике несмешивающихся жидкостей, чем вопросу разбрызгивания вторичных капель в газовую среду.

В данной работе мы впервые рассмотрим постановку задачи, описывающее падение капельной жидкости «А» на пленку конечной толщины несмешивающейся целевой жидкости «В» с меньшей плотностью, которая находится на поверхности резервуара с целевой жидкостью «А». Такая постановка может быть использована как активная мера по борьбе с образованием вторичных капель, повышающей величины пороговых критериальных чисел подобия. В координатах чисел подобия Рейнольдса (Re), Онезорге (Oh), Вебера (We), Фруда (Fr) и безразмерной толщины пленки β составлены карты режимов с определением критических условий распада струи Релея, возникающей после удара капли (рис. 1).

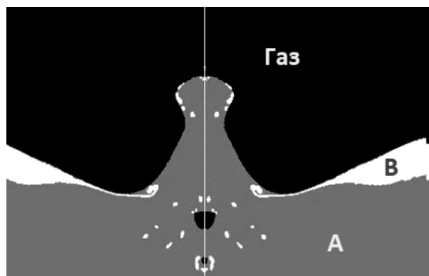


Рис. 1 Стадия формирования струи Релея после удара капли жидкости «А» (1000 кг/м^3 , 1 сСт , $0,072 \text{ Н/м}$) о поверхность жидкости «А» с пленкой жидкости «В» (963 кг/м^3 , 75 сСт , $0,021 \text{ Н/м}$). $\beta = 0,36$; $Fr = 10,3$; $Re = 2380$; $We = 56,2$; $Oh = 0,003$

Список литературы

1. Rein M. Phenomena of liquid drop impact on solid and liquid surfaces // Fluid dynamics research. 1993. Т. 12. №. 2. С. 61 – 93.
2. Mohasan M. et al. Cavity dynamics of water drop impact onto immiscible oil pool with different viscosity // Acta Mechanica Sinica. 2021. Т. 37. С. 447 – 455.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского Научного Фонда (проект РНФ 21-79-00291).

I.I. Saushin

Federal State Budgetary Institution of Science
«Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences»,
Russia 420111 Kazan, ul. Lobachevskogo, 2/31

CRITERION FOR THE FORMATION AND DECAY OF A RAYLEI JET WHEN A DROP IMPACTS ON A LIQUID WITH A LIQUID FILM

А.Е. Гольцман

Федеральный исследовательский центр
«Казанский научный центр Российской академии наук»,
420111, г. Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31

ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛЯ СКОРОСТИ АЭРОЗОЛЬНЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЙ

Согласно определению под аэрозольной струей понимается сложное многофазное течение, где дисперсная жидкая фаза переносится направленным ламинарным или турбулентным потоком газа. Данный тип течений встречается во множестве промышленных и экологических приложениях, но существенный интерес к данному направлению резко возрос в 2019 году в связи со вспышкой пандемии COVID-19, а именно по исследованию распространения аэрозольных потоков из носовой или ротовой полости при чихании. Однако понимание и моделирование испарения и рассеивания дисперсных капель жидкости в турбулентной струе остается одной из малоизученных современных проблем механики многофазных сред. Это обусловлено, прежде всего, сложностью аналитического описания неустойчивых процессов обмена массой, импульсом и турбулентной энергией между фазами. Следовательно, имеются сложности с формулировкой полностью корректного модельного описания кинематики аэрозольных струй для ресурсоемких численных методов Эйлера-Лагранжа, основанных на решении осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS), которые из-за ограничения по пространственному разрешению расчетных доменов не могут напрямую рассчитывать движение и испарение каждой частички аэрозоли.

Современное развитие экспериментальных и численных методов в плане повышения пространственного и временного разрешения, пусть даже пока для невысоких чисел Рейнольдса, позволили получить новые данные для апробации многих аналитических моделей, анализ которых позволяет иногда находить некоторое несоответствие теории и эксперимента или расчета. Например, результаты прямого численного моделирования (DNS) аэрозольной струи в области низких объемных чисел Рейнольдса (Re) порядка 10000 показали отклонение от закона d -квадрата. Авторы обнаружили, что использование этого закона, основанного на условиях окружающей среды, приводит к значительному завышению скорости испарения капель. Очевидно, что подобные тезисы о невыполнении общепризнанных законов при определенных условиях, полученных по результатам даже прямого численного моделирования, по-хорошему, требуют экспериментального подтверждения.

В данном исследовании впервые для измерения характеристик аэрозольных струй применен относительно новый оптический полевой метод измерения динамики мгновенных скоростей Smoke image velocimetry (SIV). Целью работы было получение полей высокого пространственного и временного разрешения скорости (рис. 1) и её флуктуаций, а также построения полей характеристик, требующих вычисления их пространственных производных, например Q -критерия, которые могли бы быть в последующем использованы для сопоставления с результатами DNS.

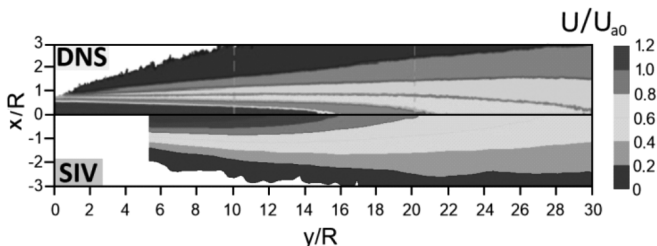


Рис. 1 Сопоставление результатов DNS (сверху) и SIV-измерений полей безразмерной скорости дисперсной фазы аэрозольной струи при $Re = 10000$

Список литературы

1. Wang J. Direct numerical simulation of an evaporating turbulent diluted jet-spray at moderate Reynolds number / J. Wang, F. Dalla Barba, F. Picano // International Journal of Multiphase Flow. 2021. 137. 103567.
2. Mikheev N.I. Estimation of turbulent energy dissipation in the boundary layer using Smoke Image Velocimetry / N. I. Mikheev, A. E. Goltsman, I. I. Saushin, O. A. Dushina // Experiments in fluids. 2017. 58(8). P. 1-10.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского Научного Фонда (проект РНФ 21-79-00289).

A.E. Goltsman

Federal State Budgetary Institution of Science
«Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences»,
Russia 420111 Kazan, ul. Lobachevskogo, 2/31

MEASURING THE VELOCITY FIELD OF AEROSOL TURBULENT JETS

Ф.В. Роншин^{1,2}, А.И. Зорькина^{1,2}, А. Редников³, L. Tadrist⁴, О.А. Кабов¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 1*

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

³ Université libre de Bruxelles, TlPs, CP 165/67,
Belgium, 1050 Brussels, av. F.D. Roosevelt, 50

⁴ Aix Marseille University, CNRS, Laboratoire IUSTI, UMR 7343,
France, 13453 Marseille, rue Enrico Fermi, 5

ИССЛЕДОВАНИЕ РОСТА ОДИНОЧНОГО ПАРОВОГО ПУЗЫРЯ В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ

Кипение – это сложный процесс, используемый во многих приложениях, таких как преобразование энергии, химическая промышленность, космическая индустрия и другие. Целью данного исследования является изучение механизмов теплопередачи, возникающих при кипении в условиях микрогравитации. Для решения этой задачи реализована программа исследований кипения в условиях микрогравитации и поддержана Европейским космическим агентством [1]. Целями эксперимента RUBI (Reference mUltiscale Boiling Investigation) являются исследование теплообмена в области контактной линии одиночного парового пузыря; исследования динамики роста пузырьков; исследования кипения при сдвиговом потоке и в электрическое поле. Детальное описание экспериментальной установки представлено в [2]. Основой эксперимента RUBI является камера со встроенным контуром принудительной конвекции (FCL). Внутри расположен тонкопленочный нагреватель. Процесс кипения инициируется локальным перегревом искусственного места зародышеобразования с помощью сфокусированного лазерного пятна. Распределение температуры нагревателя измеряется с обратной стороны с помощью ИК-камеры. Визуализация роста пузырьков исследуется с помощью высокоскоростной камеры. Установка оборудована системой терморегулирования, позволяющей гомогенно доводить рабочую жидкость FC-72 от 30 °С до 70 °С.

В работе исследованы механизмы теплообмена при кипении в условиях микрогравитации. Недогрев является одним из важных параметров, определяющим процесс роста пузырьков. Исследовано влияние недогрева на зарождение и рост одиночных паровых пузырьков. Диаметр пузырьков из-

*Ф.В. Роншин, f.ronshin@gmail.com

меряется во времени с использованием разработанного алгоритма. Выделено несколько стадий роста пузырьков. Показано, что недогрев оказывает существенное влияние на все стадии роста пузырьков. Разработана численная модель, позволяющая исследовать рост пузырьков. Проведено сравнение численных и экспериментальных результатов для анализа влияния недогрева на рост пузырьков. Исследовано влияние растворенных инертных газов на рост одиночных паровых пузырей.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10357, <https://rscf.ru/project/21-79-10357/>

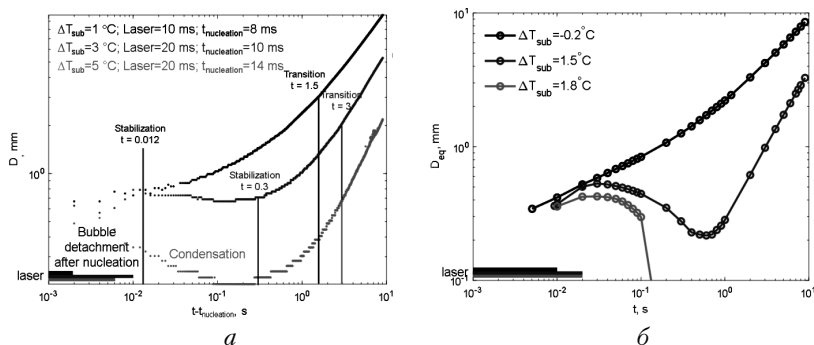


Рис. 1. Влияние недогрева на динамику роста одиночного парового пузыря: *а* – экспериментальные данные; *б* – численное моделирование

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., Zupancic M., ... & Tadrist L.** (2022). The multiscale boiling investigation on-board the International Space Station: An overview. Applied thermal engineering, 117932.

F.V. Ronshin^{1,2}, *A.I. Zorkina*^{1,2}, *A. Rednikov*³, *L. Tadrist*⁴, *O.A. Kabov*¹

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics,
Russia, 630090 Novosibirsk, Acad. Lavrentiev ave., 1

² Novosibirsk State University,

Russia, 630090 Novosibirsk, Pirogov str., 1

³ Universit  libre de Bruxelles, TIPs, CP 165/67,

Belgium, 1050 Brussels, av. F.D. Roosevelt, 50

⁴ Aix Marseille Universit , CNRS, Laboratoire IUSTI, UMR 7343,

France, 13453 Marseille, rue Enrico Fermi, 5

SINGLE VAPOR BUBBLE GROWTH UNDER MICROGRAVITY CONDITIONS

*И.А. Ячевский, Ю.Ю. Пузина*Национальный Исследовательский Университет «МЭИ»,
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14

КРИТИЧЕСКИЕ ТЕПЛОВЫЕ ПОТОКИ ПРИ КИПЕНИИ ГЕЛИЯ II В СТЕСНЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Жидкий гелий широко применяется в системах криостатирования оборудования различного назначения, в том числе с использованием сверхпроводящих магнитов. Для стабильного функционирования таких систем важно контролировать величину теплового потока, не доводя её до критического (пикового) значения, тем самым предотвращая появление пара и режима плёночного кипения гелия. Поэтому целью данной работы ставится анализ экспериментальных данных по кипению сверхтекучего гелия для различной геометрии с определением величины теплового потока, при котором начинается парообразование. При этом помимо формы и особенностей расположения нагревателя рассматриваются независимые параметры экспериментов: температура жидкости и глубина погружения нагревателя.

Как известно, стесненные условия, в том числе при наличии пористых покрытий, позволяют достигать существенного повышения пикового теплового потока [1]. Вместе с тем, и восстановительный тепловой поток, при котором происходит исчезновение пара, и жидкость приходит в состояние непосредственного контакта с нагревателем, также увеличивается. Величину восстановительного потока можно определять аналитически [2] с использованием результатов молекулярно-кинетического анализа.

Опыты проводятся в двух ячейках с различной конструкцией. В первой используется цилиндрический нагреватель диаметром 3 мм, который располагается внутри коаксиальной пористой структуры, состоящей из тканой металлической сетки, плотно намотанной в несколько слоёв. С подробным описанием ячейки можно ознакомиться в [3]. Для сравнения с таким же нагревателем проводятся эксперименты в свободном объеме.

Вторая ячейка представляет собой прозрачную U-образную трубку внутренним диаметром 16 мм. Один конец трубки герметично закрывается теплоизоляционной пробкой. На её торце размещён плоский нагреватель диаметром 11 мм. Внутри колена помещены монодисперсные шарики диаметром 240 мкм, изготовленные из сплава свинец-сурьма, выполняющие роль пористой структуры. Для проведения контрольных экспериментов использовалась также трубка без засыпки.

В ходе опытов производилась видеофиксация момента появления паровой плёнки вблизи греющей поверхности, а также автоматическая регист-

рация режимных параметров. В результате были обнаружены различные варианты развития процессов:

а) Пар не возникает, жидкость остается в контакте с нагревателем, температура гелия-II увеличивается. Вместе с этим начинает увеличиваться и давление в криостате.

б) При подаче тепловой нагрузки происходит образование пара, температура нагревателя резко увеличивается до 18-20К (рис. 1), также начинает возрастать давление в криостате. Дальнейшее поведение паровой пленки зависит от геометрии ячейки и в настоящей работе не рассматривается. Этот вариант соответствует величине пиковой тепловой нагрузки.

в) Для случаев, когда изучается влияние теплового потока на динамику границы раздела фаз пар – жидкость, при снижении нагрузки нагревателя наступает момент схлопывания паровой пленки (восстановительный тепловой поток).

Таким образом, на основании анализа экспериментальных данных получены значения пиковых, и для некоторых случаев восстановительных тепловых потоков в зависимости от параметров экспериментов.

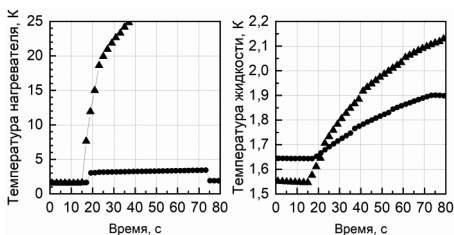


Рис. 1. Температуры нагревателя и жидкости во время эксперимента: ▲ – $q = 11 \text{ кВт/м}^2$, пленочное кипение; ● – $q = 7 \text{ кВт/м}^2$, отсутствие кипения

Работа выполнена при частичной поддержке Российского Научного Фонда (проект №23-29-00342).

Список литературы

1. **Arend I., Li Y.Z., Lyders K., Ruppert U.** Heat flux investigations on wires coated with porous insulation in superfluid helium // *Cryogenics*, 1996. V. 36. P. 215 – 218.

2. **Kryukov A.P., Van Sciver S.W.** Calculation of the recovery heat flux film boiling in superfluid helium // *Cryogenics*, 1981. V.21, №. 9. P. 525 – 528.

2. **Королев П.В., Крюков А.П., Пузина Ю.Ю.** Конструкция экспериментальной ячейки для исследования кипения гелия-II в условиях невесомости // *Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ*. 2012. Т. 130. №. 5. С. 43 – 50.2.

I.A. Yachevsky, Yu.Yu. Puzina

Moscow Power Engineering Institute,
Russia 111250 Moscow, Krasnokazarmenaya, 14

CRITICAL HEAT FLOWS DURING HELIUM II BOILING IN CONSTRAINED CONDITIONS

Е.А. Белавина^{1,2}, Д.А. Бердюгин¹, А.А. Ертулёв¹, Н.Ю. Пятницкая^{1,2}

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

² Объединенный институт высоких температур РАН,
125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2

ОБЪЕМНОЕ ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЕ ИМИТАТОРА РАСПЛАВА СОЛИ, ПРИМЕНИТЕЛЬНО К КОНЦЕПЦИИ ЖИДКОСОЛЕВОГО РЕАКТОРА

На сегодняшний день актуальным стоит вопрос хранения и повторного использования отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), которое получается в результате топливной кампании реакторов типа ВВЭР, и имеет в своем составе невыгоревший уран и трансурановые элементы, которые в дальнейшем могут быть полезны в отрасли медицины и промышленности, а также повторно использованы при создании системы замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ). Возможным решением в этой области может послужить реактор с расплавом солей, который входит в перечень конструкций реакторов IV поколения и является потенциально обладающим наибольшей пассивной безопасностью из шести моделей, рассмотренных в рамках Gen-4 [1]. В долгосрочной перспективе технологии жидкосолевых ядерных реакторов (ЖСР) с циркулирующим топливом могут быть востребованы как для создания Th-U размножителя (ЖСР-Р), так и в качестве нового элемента в системе ядерной энергетики в симбиозе с твердо-топливными реакторами для дожигания минорных актинидов (америций, кюрий, нептуний) из ОЯТ твердо-топливных реакторов (ЖСР-С) [2]. В связи с этим, комплексное исследование, состоящее из изучения свойств перспективных расплавов фторидных солей, а также создание надежной экспериментальной базы для верификации инженерных расчётов, представляют особый интерес для проектирования реакторных установок. Работа в этой области ведется коллективом авторов НИУ «МЭИ»-ОИВТ РАН.

В рамках данной работы выполнено экспериментальное и численное исследование, особенностей естественной конвекции имитатора расплава соли (водный раствор КОН) с внутренними источниками тепловыделения. Моделирование объемного тепловыделения в эксперименте реализовано за счет пропускания переменного электрического тока через медные электроды и раствор электролита с максимальной удельной мощностью 70 Вт/м^3 . Экспериментальный стенд был выполнен в виде ячейки прямоугольной геометрии с характерными размерами 40×20 см, заполненной водным раствором КОН с открытой верхней поверхностью. Реализация и поддержание стационарного режима

на протяжении всего эксперимента осуществлялась за счет смонтированных на электродах холодильных камер. В совокупности с медными пластинами, которые фиксируются внутри ячейки, объем рабочей зоны составлял приблизительно 10 – 13 литров. Численные расчеты были выполнены посредством программной среды COMSOL Multiphysic и полностью повторили геометрию рабочей ячейки, граничные условия и параметры эксперимента.

Численный расчет и результаты экспериментального исследования показали, что разница значений температур на дне ячейки и у её поверхности составляет порядка 5 °С. При этом распределение электрического потенциала между медными пластинами однородное, а значит, тепловыделение по всему объему можно считать равномерным. Таким образом, предложенный подход для моделирования процессов естественной конвекции в условиях объемного тепловыделения можно считать корректным.

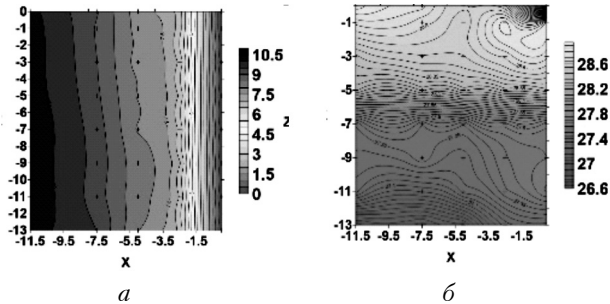


Рис.1 Распределение поля потенциала (а) и температурного поля (б) в плоскости xz

Список литературы

1. International atomic energy agency, Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management, Nuclear Energy Series, 2022.
2. Жидкосольевые ядерные реакторы / В.Л. Блинкин, В.М. Новиков. М.: Атомиздат, 1978. 1112 с.

E.A. Belavina^{1,2}, *D. A. Berdyugin*¹, *A. A. Erpulev*¹, *N. Yu. Pyatnitskaya*^{1,2}

¹ National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,
Russia 111250 Moscow, Krasnokazarmennaya street, 14

² Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences (JIHT),
Russia, 125412, Moscow, Izhorskaya st. 13 Bd.2

HEAT GENERATION IN VOLUME BY MOLTEN SALT SIMULATOR IN CONCEPT OF A MOLTEN SALT REACTOR FOR THE REACTORS OF GENERATION IV

А.Н. Осипцов, И.В. Голубкина

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова,
119192, г. Москва, Мичуринский пр., д. 1*

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСИ МЕЛКИХ КАПЕЛЬ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ГАЗА НА ТЕПЛООБМЕН В ОБЛАСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОЛНЫ УПЛОТНЕНИЯ С ПЛОСКОЙ СТЕНКОЙ

Рассматривается сверхзвуковое стационарное течение газа с примесью испаряющихся капель в области взаимодействия ударной волны с плоской теплоизолированной стенкой. Возможны как регулярный, так и маховский режим отражения волны от стенки. В волнах уплотнения температура газа повышается, поэтому капли могут испариться частично или полностью. В работе рассматриваются случаи слабых волн, в которых не происходит полного испарения капель. Падающая или отраженная волна может вырождаться в волну с полной дисперсией [1].

Исследуется структура течения «внутри» волн уплотнения и в окрестности «пятна» падения волны на поверхность стенки. Особое внимание уделяется расчету межфазного теплообмена вблизи стенки. Предполагается, что поток инерционных капель, развернувшись за падающей косою ударной волной, будет попадать на стенку и способствовать снижению равновесной температуры стенки. В случае маховского отражения рассматривается локальная область вблизи стенки, в которой маховскую ножку можно считать прямой и перпендикулярной стенке. В рамках модели двухфазного ламинарного пограничного слоя [2] рассчитывается течение вблизи поверхности с учетом боковой силы Сэфмана [3], благодаря которой капли выпадают на стенку. Как в случае инерционного попадания капель на стенку при регулярном отражении, так и под действием силы Сэфмана при маховском, на поверхности стенки может формироваться тонкая пленка, температура жидкости в которой равна температуре капель в набегающем невозмущенном потоке. В работе используется упрощенная схема формирования жидкой пленки оседающими на стенку каплями, когда эффектами неустойчивости и разбрызгивания пленки пренебрегается. Исследуется зависимость протяженности зоны выпадения капель и существования жидкой пленки от параметров набегающего невозмущенного потока, таких как число Маха и относительная массовая концентрация капель. На рис. 1 приведено распределение безразмерной толщины пленки вдоль стенки за прямым маховским скачком для различных значений определяющих параметров.

* И.В. Голубкина, giv-mm@mail.ru

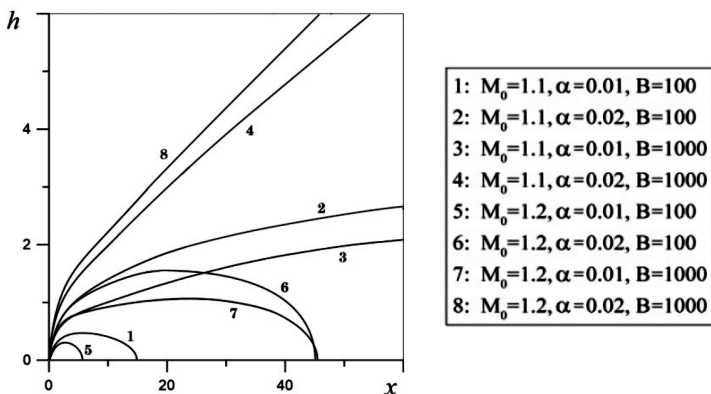


Рис. 1. Изменение безразмерной толщины пленки h вдоль стенки для различных наборов параметров: числа Маха M_0 , относительной массовой концентрации капель в набегающем потоке α и параметра B , характеризующего величину силы Саффмана

Параметрическое исследование динамической и тепловой структуры двухфазного пограничного слоя за точкой падения волны на стенку показало существенное влияние даже небольшой примеси жидких капель на температуру адиабатической стенки. При этом не выявлено заметных преимуществ использования маховского режима отражения волны с точки зрения значительного увеличения зоны существования жидкой пленки на обтекаемой поверхности.

Работа выполнена за счет средств гранта Российского Научного Фонда (проект №19-19-00234).

Список литературы

1. **Marble F.** Dynamics of dusty gases // Annu. Rev. Fluid Mech. 1970. V. 2. P. 397 – 446.
2. **Osiptsov A.N.** Mathematical modeling of dusty-gas boundary layers // Appl. Mech. Rev. 1997. V. 50. P. 357 – 370.
3. **Saffman P.G.** Lift on a small sphere in a slow shear flow// J. Fluid Mech. 1965. V. 22. P. 385.

I. V. Golubkina, A. N. Osiptsov

Institute of Mechanics of Lomonosov Moscow State University,
Russia 119192 Moscow, Michurinsky Prospekt

THE EFFECT OF SMALL DROPLETS ADMIXTURE IN A SUPERSONIC GAS FLOW ON HEAT EXCHANGE IN THE PLACE OF INTERACTION OF THE SHOCK WAVE WITH A FLAT WALL

В.С. Сердюков¹, И.П. Малахов¹, А.С. Суртаев¹

¹ Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, д. 1

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА ЛОКАЛЬНЫЙ ТЕПЛООБМЕН ПОД ПАРОВЫМИ ПУЗЫРЯМИ ПРИ КИПЕНИИ ЖИДКОСТИ

Кипение жидкости является одним из наиболее эффективных способов теплоотвода и широко используется в различных областях промышленности, в частности, в теплоэнергетике, для охлаждения атомных реакторов, в химической и пищевой промышленности и т.д. Кроме того, важной задачей является повышение функциональности и надежности работы различных устройств микроэлектроники, для чего необходимо поддерживать температуру их элементов постоянной на заданном уровне. Кипение является перспективным способом для охлаждения таких устройств, в частности, двухфазное погружное охлаждение уже активно применяется в работе сверхпроизводительных серверов. Отдельного внимания заслуживают процессы тепло- и массообмена, имеющие место при кипении жидкости в области субатмосферных давлений. Понижение давления позволяет существенно снизить температуру кипения рабочей жидкости и, как следствие, уменьшить энергозатраты в конкретном промышленном цикле. Поэтому кипение при субатмосферных давлениях реализуется в ряде энергетического оборудования. Кроме того, кипение при пониженном давлении может быть использовано для создания новых перспективных технологий на основе возобновляемых источников энергии, например, для проектирования и создания высокоэффективных систем хранения солнечной энергии и т.д.

В настоящей работе было проведено экспериментальное исследование эволюции нестационарного температурного поля при кипении насыщенного этилового спирта в условиях большого объема при варьировании давления в диапазоне 12 – 101,2 кПа. Опытные данные были получены с использованием термографической съемки с высокими временным (1500 кадров/сек) и пространственным разрешениями (250 мкм/пикс), что позволило на их основе восстановить поле распределения теплового и провести исследование влияния давления на интенсивность локального теплообмена в окрестности контактной линии под паровыми пузырями.

На рис. 1 представлены карты распределения теплового потока при кипении этилового спирта при различных давлениях. Видно, что с понижением давления происходит заметное уменьшение количества центров парообразования, при этом размер отрывающихся паровых пузырей и их время

жизни на поверхности нагрева возрастает. Кроме того, отчетливо видно, что в области микрослоевого испарения под паровыми пузырями абсолютное значение локального теплового потока снижается по мере уменьшения давления. При этом также видно, что изменение давления сказывается и на интенсивности теплоотвода в области не занятой паровыми пузырями, т.е. на конвективной составляющей интегрального теплообмена при кипении согласно механистическому подходу.

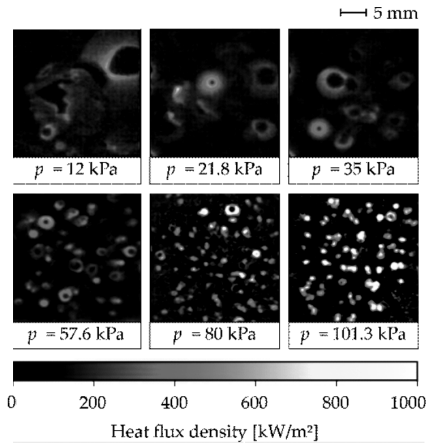


Рис. 1. Карты распределения теплового потока при кипении этилового спирта при различных давлениях

Анализ полученных результатов показывает, что с понижением давления максимальная плотность теплового потока, отводимого за счет испарения микрослоя заметно снижается. Так, отношение данной величины ($q_{ml\ max}$) к входной мощности тепловыделения понижается с 27.7 раз ($q_{ml\ max} \approx 4,36... \cdot 10^3$ кВт/м²) при кипении в условиях атмосферного давления до 3,3 раз ($q_{ml\ max} \approx 484$ кВт/м²) при давлении 12 кПа. Проведенные на основе уравнения теплопроводности оценки влияния давления на толщину микрослоя показали, что понижение давления от атмосферного до 12 кПа приводит к повышению толщины микрослоя более, чем в 8 раз – от 7 мкм до 57 мкм.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского Научного Фонда (проект № 22-79-00174).

V.S. Serdyukov¹, I.P. Malakhov¹, A.S. Surtayev¹

¹Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS,
Russia 630090 Novosibirsk, Lavrentiev ave. 1

THE PRESSURE INFLUENCE ON LOCAL HEAT TRANSFER RATE UNDER THE VAPOR BUBBLES DURING BOILING

СЕКЦИЯ 3

**ТЕПЛО-И МАССООБМЕН
В УСЛОВИЯХ ХИМИЧЕСКИХ
ПРЕВРАЩЕНИЙ, ГОРЕНИЕ**

К.Е. Веселов¹, О.А. Ебдокимов¹

¹ ФГБОУ ВО Рыбинский государственный авиационный университет
им П.А. Соловьева, 152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, д. 53

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИКИ И ГОРЕНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА В МОДЕЛЬНОЙ ВИХРЕВОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

Камера сгорания является одним из наиболее сложных узлов газотурбинного двигателя (ГТД), в котором реализуется целый комплекс теплофизических процессов. Экспериментальные исследования камер сгорания ГТД сопряжены с перечнем трудностей, зачастую требуют применения упрощенных моделей, поэтому их применимость ограничена.

Эффективным способом исследования рабочего процесса камер сгорания сегодня считается численное моделирование, которое, с учетом адекватной валидации, обеспечивает надежное прогнозирование протекания процессов. Тем не менее, в настоящее время, не существует универсального подхода к численному моделированию газодинамики и горения в энергетических установках, что приводит к необходимости индивидуальной настройки математических уравнений в рамках отдельных теплофизических частных задач, что ограничивает их применимость.

Валидация схемы к моделированию рабочего процесса на более простых задачах имеет большой потенциал в рамках разработки рекомендаций к моделированию рабочего процесса камер сгорания.

Цель настоящей работы состоит в обосновании валидационного подхода к моделированию теплофизических процессов в камере сгорания, позволяющего повысить точность и адекватность получаемых результатов в приемлемые сроки. Для этого рассматриваются стационарные и нестационарные подходы (RANS и URANS) с замыканием на основе распространенных моделей турбулентности, а также гибридный вихреразрешающий подход DES в совокупности с Flamelet-PDF моделью для описания горения жидкого керосина.

В рамках работы проведен сопоставительный анализ результатов моделирования с данными бесконтактных оптических измерений на основе методов PIV и СН*-хемилюминесценции [1,2].

Численное исследование рабочего процесса модельной камеры сгорания с двухрядным фронтальным закручивающим устройством позволило выявить особенности применения различных моделей турбулентности, а также гибридных вихреразрешающих подходов в совокупности с относительно подробной схемой кинетических реакций (883 реакции без учета образования NO_x) с точки зрения корректного описания распределений скорости и темпе-

ратуры в зоне горения. Исходя из проведенного анализа, наиболее корректное моделирование процессов газодинамики и горения обеспечивается применением нестационарной постановки с использованием гибридных вихререзающих подходов, заключающихся в использовании LES подхода в ядре течения и RANS – моделирования вблизи стенок.

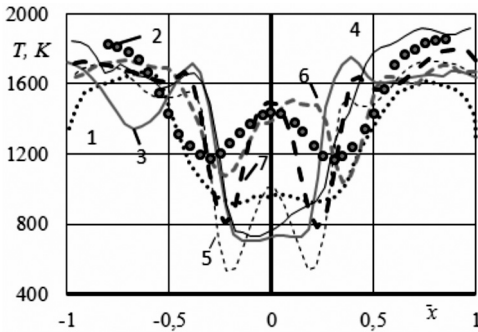


Рис. 1. Распределение температуры в сечении камеры на высоте $z = 0,625-x$:
 1 – LES [1]; 2 – CH* [2] (эксперимент); 3 – RSM SSG; 4 – SST стационар.; 5 – SST нестационар.; 6 – DES, 7 – SAS-SST;
 x – половина ширины камеры

Результаты данной работы демонстрируют необходимость применения нестационарных подходов для получения качественного соответствия, а также ставят необходимость дальнейшего исследования процесса двухфазного горения с акцентированием внимания на моделирование межфазовых процессов теплообмена: в области двухфазных течений наблюдается наибольшее несоответствие применяемых подходов к моделированию процесса относительно экспериментальных данных (рис. 1). Теме не менее, выполненные исследования могут быть положены в основу разрабатываемого подхода к проектированию камер сгорания авиационных газотурбинных двигателей.

Список литературы

1. **Eckel G.** et al. LES of a swirl-stabilized kerosene spray flame with a multi-component vaporization model and detailed chemistry // *Combustion and Flame*. 2019. Vol. 207. P. 134–152.
2. **Grohmann J.** et al. Comparison of the Combustion Characteristics of Liquid Single-Component Fuels in a Gas Turbine Model Combustor // *Volume 4A: Combustion, Fuels and Emissions*. Seoul, South Korea: American Society of Mechanical Engineers, 2016. P. V04AT04A010.

K.E. Veselov¹, O.A. Evdokimov¹

¹ Rybinsk State Aviation Technical University named after P. A. Soloviev, Russia, Rybinsk, 152934, Pushkin st., 53

A STUDY OF FLOW STRUCTURE AND LIQUID FUEL COMBUSTION IN A MODEL SWIRL COMBUSTOR

Ж.А. Косторева¹, А.А. Косторева¹, Г.В. Кузнецов¹

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30*

ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА ЗАЖИГАНИЯ ЧАСТИЦЫ ДРЕВЕСНОЙ БИОМССЫ

В настоящее время одним из перспективных (а может и самым перспективным) возобновляемым источником энергии является биомасса (отходы деревопереработки [1] и сельского хозяйства [2], а также лесной горючий материал [3]). Древесная биомасса имеет несколько вполне очевидных значимых преимуществ, как по сравнению с традиционными энергоносителями (уголь или нефть), так и с ветрогенераторами и солнечными батареями. Во-первых, древесина является единственным углерод-нейтральным топливом [4]. При ее сжигании формируется диоксид углерода, который не нарушает общего баланса CO_2 в мировом геохимическом цикле углерода. Во-вторых, древесная биомасса является относительно дешевым источником энергии: древесина различных видов и пород произрастает практически во всех (за исключением Антарктики и пустыни Атакама) регионах планеты. В-третьих, (очень важное преимущество), древесная биомасса, как правило, практически не содержит серы (во всяком случае много меньше чем у углей). Соответственно, при ее сжигании образуется значительно меньше по сравнению с углями оксидов серы (SO_x). Также по результатам экспериментальных исследований [6] установлено, что при совместном сжигании угля с биомассой существенно снижаются концентрации оксидов азота и серы в дымовых газах таких смесей по сравнению с процессами горения однородного угля. Все перечисленные выше преимущества создают предпосылки для активного внедрения биомассы в общий баланс тепло- и электрогенерации.

В статье приведен анализ влияния влажности древесной биомассы на механизмы зажигания и горения последних. Исследования проводились на экспериментальной установке, соответствующей по температурам топочному пространству типичных котельных агрегатов (873-1273 К).

Установлено, что зажигание происходит в газовой фазе на расстоянии, зависящем от температуры внешней среды. Чем больше температура воздуха, тем больше расстояние от поверхности частицы до зоны начала горения газообразных продуктов пиролиза древесины.

* Ж.А. Косторева, zhanna.kostoreva@yandex.ru

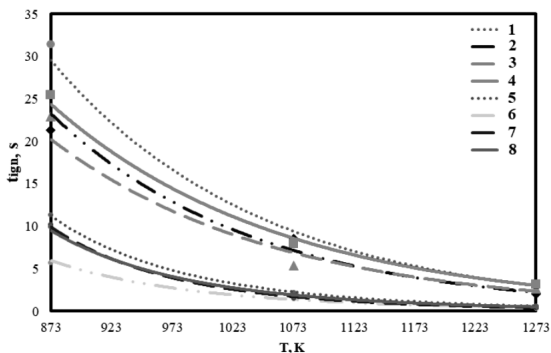


Рис. 1. Зависимости времени задержки зажигания частиц древесной биомассы от температуры внешней среды:

- 1 – береза влажная;
- 2 – осина влажная;
- 3 – кедр влажный;
- 4 – сосна влажная;
- 5 – береза сухая [7];
- 6 – осина сухая [7];
- 7 – кедр сухой [7];
- 8 – сосна сухая [7]

Список литературы

1. **Zhou J., Tabata T.** Economic, societal, and environmental evaluation of woody biomass heat utilization: A case study in Kobe, Japan // *Renewable Energy*. 2022. V.188. P. 259 – 268.

2. **Vandecasteele B., Boogaerts Ch., Vandaele E.** Combining woody biomass for combustion with green waste composting: Effect of removal of woody biomass on compost quality // *Waste Management*. 2016. V. 58. P. 169 – 180.

3. **Silva J.P., Teixeira S., Grilo E., Peters B., Teixeira J.C.** Analysis and monitoring of the combustion performance in a biomass power plant // *Cleaner Engineering and Technology*. 2021. V. 5. P. 100334.

4. **Briones-Hidrovo A., Copa J., Tarelho L. A.C., Gonзалves C., Costa T.P., Dias A.C.** Environmental and energy performance of residual forest biomass for electricity generation: Gasification vs. combustion // *Journal of Cleaner Production*. 2021. V. 289. P. 125680.

6. **Kuznetsov G.V., Yankovski S.A.** Conditions and Characteristics in Ignition of Composite Fuels Based on Coal with the Addition of Wood // *Thermal Engineering*. 2019. V. 66. P. 133 – 137.

7. **Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Gutareva N.Y., Kostoreva A.A., Kostoreva Zh. A., Malyshev D.V., Gutareva N.Y.** Peculiar properties of the ignition process of a wood biomass // *Biomass and bioenergy*. 2023. V. 170. P. 106704.

Исследование поддержано РНФ №18-79-10015-Р <https://rscf.ru/project/21-79-03032/>

Zh.A. Kostoreva¹ AA. Kostoreva¹, G.V. Kuznetsov¹

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
Russia 634050 Tomsk, Lenin Avenue, 30

FEATURES OF THE IGNITION MECHANISM OF A WOODEN BIOMASS PARTICLE

Е.Г. Орлова, Д.В. Феоктистов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр-т Ленина, д. 30

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ТЕКСТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ КЕРАМИКИ

Керамические материалы и композиты широко применяются в качестве конструкционных материалов в различных отраслях, например при конструировании теплообменных аппаратов, тепловых двигателей, лопаток турбин, защитных оболочек ядерных реакторов, элементов камер сгорания авиакосмической техники. Последнее связано с высокой жаропрочностью, жаростойкостью, трещиностойкостью, износостойкостью в совокупности с длительным жизненным циклом в условиях высокотемпературного окисления при температурах 1200 – 1600 °С [1]. В настоящей работе исследовалась возможность интенсификации процессов зажигания и горения капель перспективных гелеобразных топлив на поверхностях керамических материалов за счет создания развитой многомодальной шероховатости лазерным излучением. Исследуемые процессы моделируют сжигание гелеобразных топлив в камерах сгорания, изготовленных из керамических материалов.

Безметалльные и металлизированные топлива изготовлены по хорошо апробированной методике [2]. Компонентный состав топлива – водный раствор ПВС, отработанное масло, микро- и нано-частицы меди или железа.

Субмикронная керамика SiC получена из коммерческого ультрадисперсного порошка SiC F1200 с добавлением спекающих добавок алюминия, бора, углерода методом искрового плазменного спекания. Поверхности изготовленных образцов обрабатывались тремя методами: шлифовкой, полировкой, наносекундным лазерным излучением. Образцы исследовались методами рентгеновской дифрактометрии и профилометрии, микроскопии.

Зажигание и горение частиц гелеобразных топлив исследовались в условиях кондуктивного нагрева на поверхностях керамики. Нагревательный элемент представляет собой спираль индуктора. Исследуемые процессы регистрировались высокоскоростной видеокамерой Phantom v411. По результатам выполненных экспериментов определялись время задержки зажигания и время полного выгорания, средняя скорость движения фрагментов, отделившихся от топлива при диспергировании, число локальных микровзрывов капли топлива, а также средний размер фрагментов, отделившихся при диспергировании капли расплава топлива.

Установлено, что минимальная температура зажигания безметалльного и металлизированного гелеобразного топлива выше на 10 – 40 °С по сравнению с аналогичной характеристикой горючей жидкости (отработанного масла И-40). Установлено что, если прирост площади поверхности керамики не превышает 1,6 % (параметр Sdr), то шероховатость не влияет на минимальную температуру зажигания металлизированного и безметалльного гелеобразного топлива. В условиях, когда прирост площади поверхности за счет шероховатости превышает 6,3 %, минимальная температура зажигания гелеобразного топлива увеличивается на 10 °С. С дальнейшим ростом площади поверхности за счет шероховатости до 8,2 % эта величина увеличивается еще на 10 °С.

Установлено, что лазерная обработка поверхностей керамики является перспективным способом, позволяющим за счет формируемой текстуры управлять временем задержки зажигания горючей жидкости ($\pm 48\%$), металлизированных и безметалльных гелеобразных топлив ($\pm 35\%$). Для уменьшения времени зажигания жидких топлив в условиях лазерного текстурирования поверхностей керамики необходимо создавать более развитую, многоуровневую шероховатость, характеризующуюся параметром Sdr более 6,3 %. Также лазерная обработка поверхностей керамики позволяет значительно интенсифицировать процесс кипения и диспергирования гелеобразных топлив (увеличить число локальных микровзрывов капли топлива, среднюю скорость движения фрагментов, отделившихся от топлива), а также сократить время выгорания за счет создания разноуровневой, многомодальной текстуры, характеризующейся более развитой шероховатостью по сравнению с текстурой, которую можно сформировать абразивными материалами при шлифовке и полировке.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ в рамках научного проекта № 21-73-10245.

Список литературы

1. **Kablov E.N., Grashchenkov D.V., Isaeva N.V., Solntsev S.S.** Perspective high-temperature ceramic composite materials // Russ. J. Gen. Chem. 2011. V. 81. P. 986 – 991.
2. **Vershinina K.Y., Glushkov D.O., Nigay A.G., Yanovsky V.A., Yashutina O.S.** Oil-filled cryogels: new approach for storage and utilization of liquid combustible wastes // Ind. Eng. Chem. Res. 2019. V. 58. P. 6830 – 6840.

E.G. Orlova, D.V. Feoktistov

National Research Tomsk Polytechnic university,
Russia 634050 Tomsk, Lenin Ave. 30

INTENSIFICATION OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROCESSES ON TEXTURED CERAMIC SURFACES

О.О. Мильман^{1,2}, Д.В. Брдынkevич¹, В.С. Крылов^{1,2}, А.В. Птахин^{1,2}

¹ЗАО «НПВП «Турбокон», 248010, г. Калуга, ул. Комсомольская роща, д. 43

²ФГБУ ВО КГУ им. К.Э. Циолковского, 248023, г. Калуга, ул. Ст. Разина, д. 26

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТАНОВКИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ГАЗОВОГО ПРЕРЕГРЕВА ПАРА (ДГПП)

Одной из важнейших задач в области тепловой энергетики является повышение коэффициента полезного действия паровых турбин, увеличение мощности и выработки электроэнергии объектами генерации. Инновационным способом решения этой задачи является дополнительный перегрев пара, осуществляемый за счет непосредственного сжигания водорода или природного газа в паровой среде [1]. На рис. 1 показана схема дополнительного нагрева пара, выработанного в котле.

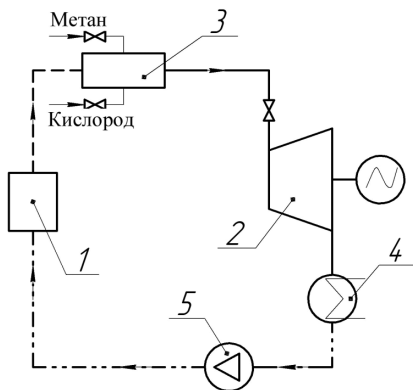


Рис. 1. Схема дополнительного перегрева пара после котла:
1 – паровой котел; 2 – турбина; 3 – камера сгорания; 4 – конденсатор;
5 – конденсатно-питательный насос

Перегрев пара в камере сгорания метанокислородного топлива – уникальная, не имеющая аналогов в мировой энергетике технология, она была разработана в НПВП «Турбокон» при участии специалистов Всероссийского теплотехнического института.

Для подтверждения работоспособности технологии ДГПП в условиях действующей ТЭС установка ДГПП была смонтирована на ТЭЦ-16 филиала ПАО «Мосэнерго» и подключена к существующему паропроводу (рис. 2).

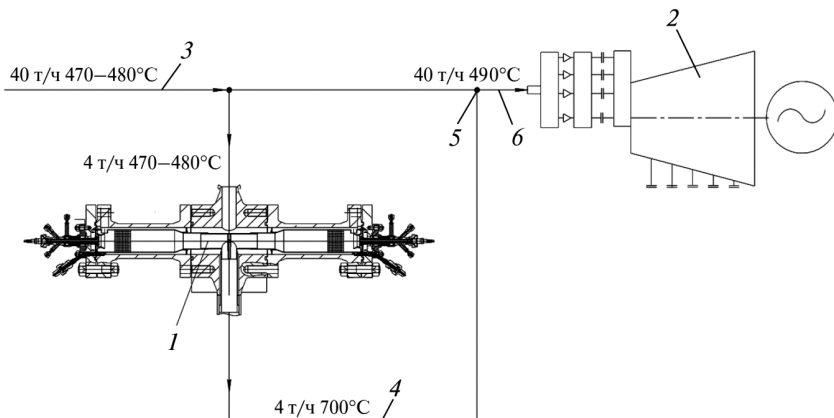


Рис.2. Схема установки ДГПП для турбины Т-25-90-4ПР-1:
 1 – установка ДГПП; 2 – турбина Т-25-90-4ПР-1; 3 – пар от котла;
 4 – перегретый пар на выходе из установки ДГПП;
 5 – узел смешения перегретого пара и основного пара;
 6 – смешанный пар на входе в турбину

В ходе серии экспериментальных исследований на площадке ТЭЦ-16 филиала ПАО «Мосэнерго» были зафиксированы устойчивый розжиг камеры сгорания и ее удовлетворительная работа при давлениях до 4 МПа, дополнительный перегрев пара составил 183еС. Зафиксированы относительно низкие температуры жаровых труб и корпуса камеры сгорания, что свидетельствует о значительном резерве в плане повышения температуры перегрева пара без замены материалов на более жаростойкие и жаропрочные.

В результате экспериментальных исследований получен научно-технический задел для разработки и создания пилотного образца высокотемпературной паровой турбины со сжиганием метана и кислорода в среде водяного пара.

Список литературы

1. Шильрайн Э.Э., Мальшенко С.И., Кулешов Г.Г. Введение в водородную энергетику. М.: Энергоатомиздат, 1984. С. 350.

O.O. Milman^{1,2}, D.V. Brdynkevich¹, V.S. Krylov^{1,2}, A.V. Ptahin^{1,2}

¹Joint Stock Scientific Production Company «Turbocon», Kaluga

²Tsiolkovsky Kaluga State University

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF THE INSTALLATION OF THE ADDITIONAL GAS STEAM PREHEATING (AGSP)

П.С. Хахулин

Московский Авиационный Институт
(Национальный Исследовательский Университет)
125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4 *

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ ЛОВОЙ ЧАСТИ СПУСКАЕМОГО АППАРАТА ВЫСОКОСКОРСОТНЫМ ПОТОКОМ

Целью настоящей работы является расчет обтекания области лобовой части спускаемых аппаратов разных конфигураций в условиях атмосфер Земли и Марса гиперзвуковым потоком. Отличительной особенностью таких течений является наличие больших градиентов термодинамических параметров, а также наличие термодинамической и химической неравновесности. Стоит отметить, что в данной работе были исключены из рассмотрения реакции образования электронов и ионов.

Для решения поставленной задачи обтекания спускаемого аппарата был использован коммерческий программный пакет ANSYS Fluent, способный, в новейших версиях, учитывать описанные выше специфические особенности высокоскоростного потока.

Задача рассматривалась в осесимметричной постановке из предположения того, что течение в остальных меридиональных сечениях будет идентичным. Для решения системы уравнений Навье-Стокса в программном пакете ANSYS Fluent применялся связанный решатель по плотности (Density-Based Solver). Расчет конвективных потоков проводился по методу Рое, выбиралась схема дискретизации второго порядка точности против потока. Был включен учет химически реагирующего течения для каждой рассматриваемой атмосферы, а именно, пятикомпонентная модель Парка для Земли, и восьмикомпонентная модель Парка для Марса, дополняющие исходную систему соответственно N-1 уравнением переноса соответствующих компонентов. Термическая неравновесность была учтена использованием двухтемпературной модели уравнения энергии (из предположения того, что поступательная и колебательная моды находятся в равновесии, а также колебательная и электронная моды в равновесии), дополняющей исходную систему уравнением сохранения колебательно-электронной энергии. Стоит отметить, что исходная система уравнений Навье-Стокса вместе с уравнениями переноса каждого химического компонента решаются в связанном виде в векторной форме, а дополнительное уравнение колебательной энергии решается отдельно от связанного набора.

*П.С. Хахулин, khakhulinpavel@gmail.com

Было рассчитано течение в области лобовой части спускаемого аппарата OREX (Orbital Re-entry Experiment) для двух высот 84.01 и 92.82 километров, для таких высот термическая неравновесность оказывает существенное влияние на распределение полей температуры и тепловых потоков в СА. На рис. 1 представлено сравнение распределения плотности теплового потока по данным Гупта и др. [1] для высоты 84.01 км.

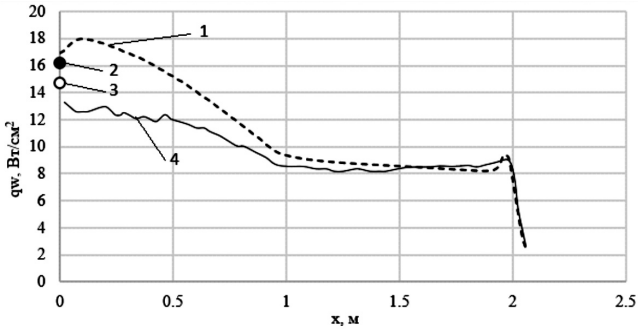


Рис. 1. Распределение плотности теплового потока в стенке по длине образующей для высоты 84,01 км:

1 – результаты настоящей работы; 2 – результат по методу корреляции Фейя-Ридделла [2]; 3 – экспериментальные данные; 4 – результаты методом прямого численного моделирования Монте-Карло

Видно хорошее совпадение полученных результатов с результатами, представленными в открытой литературе. В силу этого вывода данная математическая модель в программном пакете Ansys Fluent, дает количественно верные результаты, полученные для других высот, а также для течения химически реагирующей компонентно близкой атмосфере Марса.

Список литературы

1. Gupta R.N., Moss J.N., & Price J.M. (1997). Assessment of Thermochemical Nonequilibrium and Slip Effects for Orbital Re-Entry Experiment. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 11(4), 562 – 569.
2. Fay J.A. (1958). Theory of Stagnation Point Heat Transfer in Dissociated Air. *Journal of the Aerospace Sciences*, 25(2), 73 – 85.

P.S. Khakhulin

Moscow Aviation Institute (National Research University)
Moscow, 125993, Volokolamskoe highway, 4

NUMERICAL MODELING OF HIGH-SPEED FLOW AROUND THE FRONTAL PART OF THE DESCENT VEHICLE

*В.С. Судаков*Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН
119991, г. Москва, Ленинский пр., 53, стр. 4*

ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЕ ДВИЖЕНИЕ КАПЕЛЬ В ЭМУЛЬСИИ ПРИ ПРОТЕКАНИИ В НЕЙ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ

Системы, которые находятся вдали от состояния равновесия демонстрируют большое многообразие диссипативных структур. Одним из ярких примеров таких систем является активная материя, где объекты, входящие в состав таких систем, способны двигаться за счет потребления свободной энергии, запасенной внутри самих объектов или за счет внешних источников энергии. Существует большое многообразие механизмов движения, которые ответственны за движение активных объектов. Они связаны с действием внешних полей, ультразвука, генерацией пузырей при протекании химических реакций и течения Марангони. Динамическое поведение искусственных активных объектов во многом напоминает коллективное поведение многих живых организмов. Такие системы демонстрируют многие типы самоорганизации – вихревые структуры, активную турбулентность, процесс формирования кластеров, кристаллизацию и стеклование. Активные частицы могут двигаться как в объеме жидкости, так и на ее поверхности.

Одним из видов динамических структур является осциллирующее движение активных объектов, которое возникает в результате взаимодействия между физико-химическими процессами, диффузией и конвекцией. Например, весьма богатую динамику демонстрирует ансамбли активных капель при протекании в них реакций типа Белоусова-Жаботинского. В этом случае наблюдается формирование как осциллирующих структур во времени, так распространение химических волн в пространстве. Как правило осциллирующее движение активных объектов на межфазной поверхности связано со взаимодействием течения Марангони и поверхностно-активных веществ, которые распространяется в результате диффузии и конвекции. Вместе с тем представляет интерес исследовать вопрос о возможности возникновения возвратно-поступательного движения активных объектов вблизи межфазной поверхности воздух-вода при условии, что источник, где генерируется поверхностно-активное вещество не движется вместе с активным объектом, а неподвижен в пространстве [1].

*В.С. Судаков, sudakov6@mail.ru

В настоящей работе демонстрируется пример системы, в которой наблюдалось возвратно-поступательного движения капель масла в эмульсии масло-в-воде вблизи межфазной поверхности воздух-вода при условии, что источник вещества, влияющего на межфазное натяжение, не движется вместе с активным объектом, а неподвижен в пространстве (рис. 1).

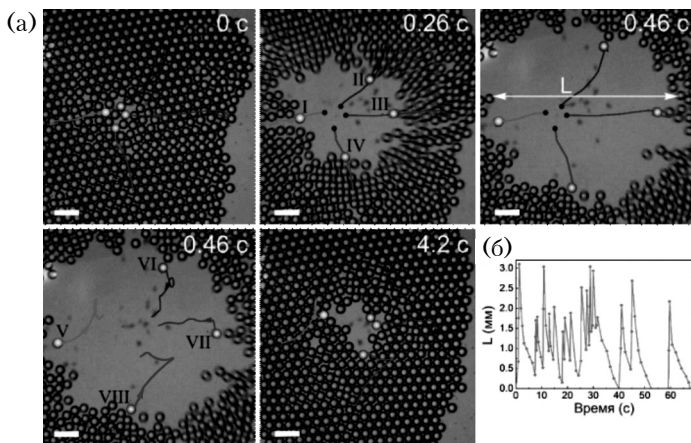


Рис. 1. Последовательность фотографий, демонстрирующая процесс расширения и схлопывания «трещины» в кристалле.

Время отсчитывается с момента начала расширения «трещины» в кристалле. Номера I – IV на линиях тока соответствуют стадии расширения «трещины». Номера V – VIII на линиях тока соответствуют стадии схлопывания «трещины» (а); зависимость ширины «трещины» в кристалле от времени (б)

Список литературы

1. Kichatov B., Korshunov A., Sudakov V., Gubernov V., Kolobov A., Korshunova E., Kiverin A. Oscillating Motion of Oil Droplets in the Emulsion Near the Air–Water Interface // J. Phys. Chem. B. 2021. V. 125(36). P. 10373 – 10382.

V.S. Sudakov

P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences
Moscow, 119991, Leninsky prospekt, 53

OSCILLATING MOTION OF DROPLETS IN THE EMULSION DURING CHEMICAL REACTIONS IN IT

К.Р. Носкова, М.М. Гурьянова, А.И. Гурьянов
ФГБОУ ВО Рыбинский государственный авиационный
технический университет им. П.А. Соловьёва,
152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, д. 53

СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЯ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ГТД С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ГАЗОДИНАМИКИ КОМПРЕССОРА

На выходе из компрессора газотурбинных двигателей (ГТД) возникает нестационарность течения из-за взаимодействия рабочего колеса и спрямляющего аппарата, что в свою очередь приводит к образованию несимметричного профиля скорости по высоте канала диффузора камеры сгорания (КС) [1, 2].

Выполнено численное моделирование ступени центробежного компрессора. В проточной части отражается физическая структура дозвукового течения потока при обтекании пространственных лопаток (основной и сплиттерной) с локальными сверхзвуковыми областями при переходе потока из роторной части рабочего колеса в статорную с лопаточным диффузором (граница раздела ротор-статор). Наибольшее значение скорости и полного давления (трансзвуковая область) наблюдается вблизи границы раздела рабочего колеса и диффузора. Таким образом, профили скорости, формирующиеся за лопаточным диффузором, а также за спрямляющим аппаратом имеют несимметричность по высоте канала.

Оценка несимметричности профиля скорости за компрессором проводится коэффициентом K , определяемым отношением среднерасходных скоростей потока в верхнем и нижнем полуканалах.

В результате расчетов на выходе из компрессора получена эпора скорости с коэффициентом $K > 1$. Дополнительно спроектированы генераторы несимметричности, формирующие на выходе профили скорости со значениями $K = 1$, $K > 1$ и $K < 1$. Полученные эпоры задавались в виде граничного условия на входе в КС.

Первоначально выполнены исследования газодинамики КС полноразмерного ГТД. При симметричной эпоре скорости ($K = 1$) наружный и внутренний кольцевые каналы равномерно заполняются рабочим телом (воздух), равномерное затекание наблюдается и во фронтальном устройстве. В области внезапного расширения образуются зоны обратных токов. Для случая при $K < 1$, расход воздуха преимущественно направлен в нижний кольцевой канал. Интенсивность отрывной зоны в области внезапного расширения возрастает, наблюдается нелобовое столкновение максимального импульса струи

с обтекателем. Это приводит к неравномерной подаче воздуха в зону смешения. Вблизи нижней стенки возникает интенсивная вихревая зона и на выходе из КС наблюдается смещение линий тока и максимум расхода в верхней стенке жаровой трубы.

Проведено численное моделирование в камере малоразмерного газотурбинного двигателя (МГТД). Расчеты выполнены аналогично полноразмерной ГТД, то есть с заданием на входе в КС несимметричной эпюры скорости. Получено, что при $K = 1$ основной входящий поток в КС МГТД распределен равномерно вдоль верхнего кольцевого канала, в жаровой трубе заметно меньше вихревых структур. Поэтому в области геометрического поворота стенок равномерное затекание воздуха. Для случаев при $K > 1$ и $K < 1$ на внутреннем радиусе образуется тороидальная вихревая структура, которая пережмает проточное течение, изменяет угол натекания на лопатки в турбине, т.е. препятствует образованию равномерных линий тока в выходном сечении, как это происходит для $K = 1$.

Наименьшие значения гидравлических потерь по тракту КС, как для полноразмерного ГТД, так и для МГТД, получены в случаях с симметричной эпюрой скорости на выходе из компрессора. При значениях $K > 1$ и $K < 1$ коэффициент χ существенно возрастает. Следовательно, при проектировании КС важным моментом является сохранение величины несимметричности в диапазоне значений K , близким к 1, что позволяет обеспечить минимум гидравлических потерь.

Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение фундаментальных научных исследований (шифр научной темы FSSG-2023-0002).

Список литературы

1. **Gur'yanova M.M.** Joint effect of input asymmetrical velocity profile and initial turbulence intensity on hydraulics of a separated diffuser of GTE combustion chamber / M.M. Gur'yanova, Sh.A. Piralishvili // Russian Aeronautics (Iz.VUZ). 2016. Vol. 59. №2. Pp. 197-205.

2. **Gur'yanova M.M.** Investigation of the Effect of the Output Parameters of the Flow behind the Compressor on the Gas Dynamics of the Separation Diffuser of the Combustion Chamber / M.M. Guryanova, K.R. Timofeeva, A.I. Guryanov // AIP Publishing. 2020. №2211. Pp. 1-5.

K.R. Noskova, M.M. Gur'yanova A.I., Gur'yanov

Soloviev Rybinsk State Aviation Technical University, Russia, Rybinsk,
Pushkina, 53

FLOW STRUCTURE IN GTE COMBUSTION CHAMBERS WITH THE INFLUENCE OF COMPRESSOR GAS DYNAMICS

А.М. Коршунов

Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН
119991, г. Москва, Ленинский пр., д. 53, стр. 4*

ДВИЖЕНИЕ ХИМИЧЕСКИ РЕАГИРУЮЩЕГО БИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПЛОВЦА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Задача перемещение пловцов, изготовленных из парамагнитных и диамагнитных материалов, во многом проблематична из-за малой величины магнитной восприимчивости и, как, следствие, магнитной силы действующих на них.

В данной работе рассматривается возможный метод преодоления этой проблемы. Здесь демонстрируется способ изготовления биметаллического пловца, который по своей сути является «химическим магнитом». В результате протекания окислительно-восстановительной реакции на поверхности пловца формируется петля с током, когда по металлу движутся электроны, а в растворе электролита движутся ионы (рис. 1).

Петля с током представляет собой элементарный магнит, поэтому на пловец в неоднородном магнитном поле действует сила, существование которой всецело определяется протеканием окислительно-восстановительной реакцией.

За счет изменения концентрации раствора электролита, пары металлов из которых изготавливается пловец и температуры раствора можно регулировать магнитные свойства пловца в широком диапазоне величин. При установлении в системе термодинамического равновесия «химический магнетизм» вырождается.

*А.М. Коршунов, korlex@yandex.ru

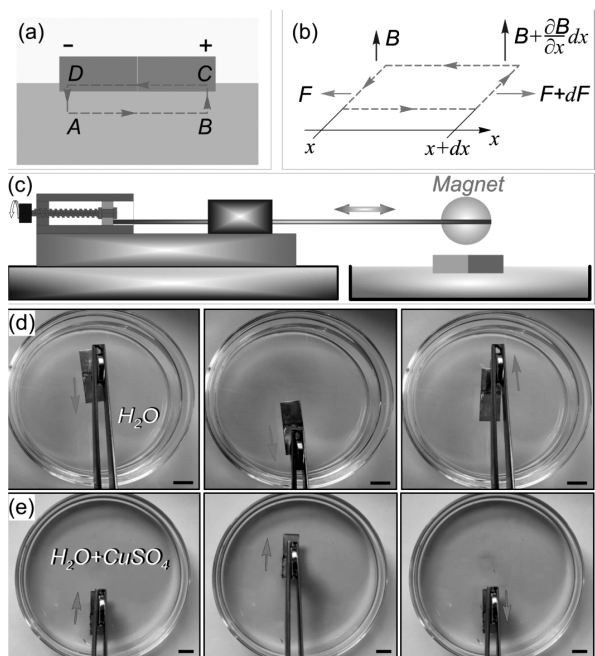


Рис. 1. Движение «химического магнита». Биметаллический пловец при протекании окислительной-восстановительной реакции охвачен петлей с током (а). Силы, действующие на пловца (б). Схема экспериментальной установки (с). Перемещение пловца на поверхности воды с помощью постоянного магнита (д). Перемещение химически реагирующего пловца на поверхности раствора сульфат меди с помощью постоянного магнита (е)

Список литературы

1. Kichatov B., Korshunov A. и др. Motion of a chemically reactive bimetal motor in a magnetic field // Phys. Chem. Chem.Phys., 2022, Т.24, Р. 19693-19696.

A.M. Korshunov

P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences
Russia, 119991, Moscow, Leninsky prosp., 53

MOTION OF CHEMICALLY REACTIVE BIMETAL MOTOR IN THE MAGNETIC FIELD

К.В. Слюсарский¹, А.К. Асылбеков¹

¹Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30*

ЗАЖИГАНИЕ СМЕСЕЙ АНТРАЦИТА С ПИРОЛИЗНОЙ ЖИДКОСТЬЮ РАЗЛИЧНОЙ ДРЕВЕСИНОЙ БИОМАССЫ

Более широкое вовлечение биомассы в промышленное производство является одним из приоритетных направлений развития современной энергетики [1]. Пиролиз является одним из наиболее перспективных направлений переработки древесной биомассы, т.к. позволяет получать продукты с высокой добавленной стоимостью [2]. Одним из эффективных решений для утилизации жидкости, образующей при пиролизе, является её сжигание [3] для полной или частичной компенсации затрат теплоты на реализацию процесса пиролиза. Однако нестабильность свойств и низкая теплота сгорания данной жидкости существенно усложняет организацию процесса её эффективного горения. Перспективным решением является применение данной жидкости в смеси с традиционными твердыми топливами, причем наибольший синергетический эффект будет достигаться при использовании низкорекреационных веществ (например, антрацита или низкорекреационных продуктов обогащения угля [4]).

В работе исследовались характеристики зажигания смесей низкорекреационного антрацита Красногорского месторождения (Кемеровская область), детальные характеристики которого приведены в [5]. В качестве пиролизной жидкости использовались образцы жидкофазных продуктов медленного пиролиза древесной биомассы хвойной (сосна) и лиственной (береза) пород при 500 °С. Жидкофазные продукты пиролиза были получены путем конденсации сформированной парогазовой смеси до температуры 80 °С. Для удаления избыточной влаги производилась механическая сепарация (с помощью делительной воронки) полученной жидкости, а также подсушка образца в печи. Зольность полученных образцов составляла 1,35 и 16,5 масс.% для образцов жидкости переработки сосны и березы, соответственно.

Образцы пиролизной жидкости и антрацита механически смешивались в массовом соотношении 5:95, 10:90 и 20:80. Время задержки зажигания определялось с помощью экспериментального стенда, описанного в [5], в диапазоне температур 500-700 °С как разница времен начала нагрева образца и появления видимого свечения на его поверхности (зажигания).

*К.В. Слюсарский, konstantinsv@tpu.ru

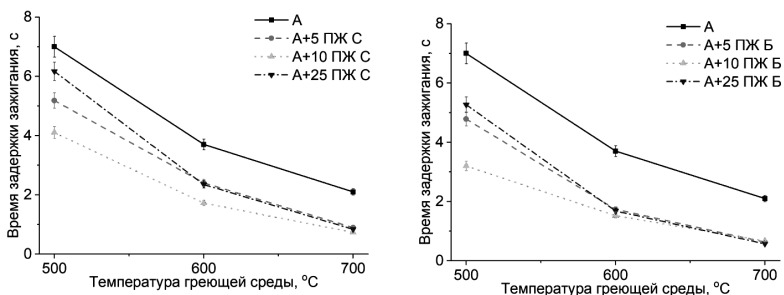


Рис. 1. Времена задержки зажигания смесей антрацита:
 1 — с пиролизной жидкостью переработки сосны; 2 — с пиролизной жидкостью переработки березы.

Времена задержки зажигания нелинейно снижались с увеличением температуры греющей среды для всех исследованных образцов. Добавка пиролизной жидкости приводила к снижению времени задержки зажигания до 40 % при 500 °С и до 65 % при 700 °С. Полученные результаты могут быть объяснены эндотермическим эффектом десорбции компонент пиролизных жидкостей и горением легколетучих компонент в удалении от образца антрацита.

Список литературы

1. **Solarte-Toro J.C. et al.** Thermochemical processing of woody biomass: A review focused on energy-driven applications and catalytic upgrading // *Renew. Sustain. Energy Rev.* Elsevier Ltd, 2021. Vol. 136. P. 110376.
2. **Fakayode O.A. et al.** State-of-the-art co-pyrolysis of lignocellulosic and macroalgae biomass feedstocks for improved bio-oil production- A review // *Fuel.* Elsevier BV, 2023. Vol. 332. P. 126071.
3. **Слосарский К.В. et al.** Технологические решения по утилизации жидких продуктов медленного пиролиза древесной биомассы // *Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* 2021. Тл. 332, № 12. С. 173 – 188.
4. **Larionov K.B. et al.** Energy recycling of pyrolysis water as a part of coal-water fuel // *Int. J. Energy Res.* John Wiley and Sons Ltd, 2021. Vol. 45, № 10. P. 14895 – 14909.
5. **Слосарский К.В. et al.** Исследование закономерностей окисления и зажигания смесей пиролизной жидкости с низкорреакционным углем // *Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* 2022. Т. 333. № 12. С. 140 – 150.

K.V. Slyusarskiy¹, A.K. Asilbekov¹

¹ Tomsk polytechnic university,
 Russia 634050 Tomsk, Lenin av., 30

IGNITION OF MIXTURES OF ANTHRACITE WITH PYROLYSIS LIQUID OF WOODY BIOMASS

**ПРИЧИНЫ РЕАЛИЗАЦИИ ВТОРИЧНОГО РАСПЫЛЕНИЯ
КАПЕЛЬ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ
НА ОСНОВЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ТЕРМОДИНАМИКИ
СМАЧИВАНИЯ И ТЕОРИИ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ
ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭНЕРГИИ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ**

Проблема негативного воздействия на окружающую среду продуктов горения ископаемых топлив может быть решена путем использования на практике новых многокомпонентных топливных смесей. Зажигание и горение таких 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. Известные результаты позволяют установить механизм диспергирования, который в обобщенной форме сводится к разрушению паровых пузырей, но не позволяют определить причины, особенности и масштабы протекания этого эффекта при зажигании и горении топливных смесей. Не разработаны основные положения теории, применимые на практике для прогнозирования гарантированного протекания диспергирования капель, в том числе топливных композиций произвольного компонентного состава. В работе доказана сформулированная гипотеза, объясняющая причину реализации паффинга и микровзрыва многокомпонентных капель в условиях высокотемпературного нагрева. 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 (σ_L^D) и полярной (σ_L^P) составляющих поверхностного натяжения компонентов, входящих в состав топлив. Поверхностное натяжение связано с энергией взаимодействия молекул в объеме конденсированной фазы, мерой кото-

рой является энергия адгезии. Слабые связи (ван-дер-ваальсовых взаимодействий) характеризуются дисперсной составляющей. Полярная составляющая поверхностного натяжения характеризует сильные связи между молекулами (водородные, ионные, ковалентные, диполь-дипольные). 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 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 $\sigma_L^P / \sigma_L^D > 1,0$) а в поверхностном натяжении другого компонента преобладает дисперсная составляющая (жидкость должна быть сильно дисперсной $\sigma_L^P / \sigma_L^D \leq 1,0$). Полученные в работе результаты способствуют не только развитию науки в области процессов вторичного распыления капель топлив, но и разработки перспективных промышленных технологий. К таким технологиям относятся: 1) в металлургии, способ отвода тепловых потоков высокой плотности от поверхностей непрерывнолитой заготовки в условиях микровзрывного диспергирования капель негорючих эмульсий и суспензий при орошении ими поверхности сляба в зоне вторичного охлаждения машин непрерывного литья заготовок; 2) в цифровых, интеллектуальных производственных технологиях способ охлаждения, базирующийся на микровзрывном диспергировании капель теплоносителей, для микроэлектронных устройств, с поверхности которых поступают тепловые потоки высокой плотности (до 1000 Вт/см²).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00417, <https://rscf.ru/project/23-29-00417/>.

E. G. Orlova, E. Y. Laga, D. V. Feoktistov

National Research Tomsk Polytechnic university,
Russia 634050 Tomsk, Lenin Ave. 30

**REASONS FOR THE ONSET OF SECONDARY SPRAYING
OF OF MULTICOMPONENT DROPLETS BASED
ON THE THERMODYNAMICS OF WETTING AND THE THEORY
OF TWO-COMPONENT SURFACE ENERGY OF SUBSTANCES
AND MATERIALS**

А.Ю. Клоев, А.И. Гурьянов

ФГБОУ ВО Рыбинский государственный авиационный технический
университет им. П.А. Соловьёва,
152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, д. 53

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАСШТАБА СТРУИ НА СТРУКТУРУ ЛАМИНАРНЫХ И ТУРБУЛЕНТНЫХ ДИФФУЗИОННЫХ ПЛАМЕН

Наиболее важными факторами при проектировании камер сгорания газотурбинных двигателей и энергетических установок являются организация устойчивого горения, повышение эффективности и снижение эмиссии загрязняющих веществ (NO_x , CO). В получивших наибольшую популярность низкоэмиссионных камерах сгорания, работающих по принципу сжигания предварительно перемешанной бедной топливоздушнoй смеси, для уменьшения эмиссии загрязняющих веществ снижают максимальную температуру в области реакции [1]. Такой подход обеспечивает устойчивость пламени на одном рабочем режиме, отклонение от которого приводит к возникновению осцилляций пламени и давления [2].

Одним из перспективных направлений развития камер сгорания газотурбинных двигателей и энергетических устройств является организация горения в массивах микро- и мезофакелов. Суть метода заключается в разделении зоны реакции на несколько локальных зон, что позволяет уменьшить время пребывания компонентов в области фронта пламени [3], обеспечивая низкий уровень выбросов оксидов азота NO_x , и повысить теплонапряженность камеры сгорания [4,5]. Такой принцип организации горения получил название микрофакельной технологии сжигания.

Для проектирования камер сгорания с микрофакельной системой сжигания топлива необходимо понимание фундаментальных основ организации горения на микро- и мезомасштабном уровне. Доступные в литературе экспериментальные и расчетные исследования, характеризующие поведение микро- и мезомасштабных пламен, носят частный характер, что затрудняет выбор оптимального масштаба и рабочего режима при проектировании.

Отсутствие комплексного исследования влияния масштабного фактора на горение жидких и газообразных, углеродных и безуглеродных топлив значительно увеличивает трудозатраты на изучение особенностей протекания процесса. Обобщение данных о распределениях тепловых, инерционных, концентрационных параметров для различных масштабов сопловых вводов по-

зволит сократить временные затраты при проектировании камер сгорания и горелочных устройств.

В работе выполнено исследование влияния масштабного фактора на горение ламинарных и турбулентных диффузионных пламен. Проведен сравнительный анализ газотермодинамических и геометрических характеристик микро-, мезо- и макромасштабных диффузионных пламен на ламинарном и турбулентном режимах течения.

Выявлено, что масштаб диффузионной струи влияет на форму ламинарного пламени. На масштабах струй 1 мм и меньше, когда влияние подъемных сил пренебрежимо мало, наблюдается изотропный перенос тепла и массы. На масштабах струй больше 5 мм, наблюдается преобладание диффузии в осевом направлении, что обусловлено влиянием подъемных сил.

Относительная высота пламени практически не зависит от масштаба струи. Зависимости относительной высоты струй от числа Рейнольдса коррелируют с теорией и экспериментальными данными.

Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение фундаментальных научных исследований (шифр научной темы FSSG-2023-0002).

Список литературы

1. **Liu Y.** Review of modern low emissions combustion technologies for aero gas turbine engines // Y. Liu, X. Sun, V. Sethi, D. Nalianda, Y-G. Li, L. Wang. Progress in aerospace sciences, 2017, 1-34 pp.
2. **Lee J.G.** Experimental diagnostics for the study of combustion instabilities in lean premixed combustors // J.G. Lee, D. A. Santavicca, J. Propuls. Power, 2003, 19 (5), 735 – 750 pp.
3. **Weiland N.T.** Testing of a hydrogen diffusion flame array injector at gas turbine conditions // N.T. Weiland, T.G. Sidwell, P.A. Strakey. Combust. Sci. Technol, 185 (7), 2013, 1132-1150 pp.
4. **Rajasegar R.** Mesoscale burner array performance analysis // R. Rajasegar, J. Choi, B. McGanna, A. Oldani, T. Lee, S.D. Hammack, C.D. Carter., J. Yoo. Combustion and Flame, 199, 2019, 324-337 pp.
5. **Choi J.** Effect of flame interaction on swirl-stabilized mesoscale burner array performance // J. Choi, R. Rajasegar, C. M. Mitsingas, Q. Liu, T. Lee, J. Yoo. Energy, 192, 2020.

A.Y. Klyuev, A.I. Guryanov

Soloviev Rybinsk State Aviation Technical University,
Russia 152934 Rybinsk, Pushkina, 53

THE INVESTIGATION OF THE EFFECT OF JET SCALE ON THE STRUCTURE OF LAMINAR AND TURBULENT DIFFUSION FLAMES

Р.Р. Халиулин, Н.В. Давыдов, В.М. Юсеф, Сейид Джафару С.С.

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ

420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10*

ТЕЧЕНИЕ В ПРОТИВОТОЧНОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Вопросы течения внутрикамерных процессов газотурбинных двигателей всегда носили актуальный характер, а благодаря разработке программных численных комплексов стало возможным получить, в значительной степени, достоверные результаты, одновременно, сократив время на доводку и испытания [1].

Проектируемая камера сгорания является противоточной, в которой направление движение потока газа внутри жаровой трубы противоположно направлению движения воздуха снаружи жаровой трубы. Такая схема позволила сократить длину камеры сгорания с незначительным увеличением ее наружного диаметра. Для численных расчетов построена геометрическая модель в программе NX. Сеточная модель выполнена с использованием тетраэдральных элементов с применением пристеночных слоев и сгущения в области геометрии со ложными элементами, общее количество составляло около 2 млн. Исследования проведены с использованием программного комплекса ANSYS-Fluent. Сходимость численного расчета определялась по результатам итерационного счета. Через некоторое время расчет останавливался и контролировались результаты по качественным и количественным показателям. Расчет продолжался до тех пор, пока данные не переставали отличаться. Во время расчета средне интегральные параметры по температуре и эмиссионные характеристики на выходе из камеры сгорания контролировались с помощью специально настроенных графиков. Все средние массовые показатели осреднялись по числу итераций. Расчеты начинали сходиться примерно к 8000 итераций и продолжался набор данных для осреднений до 10000 итераций.

В представленной работе детально описаны особенности численных расчетов течения и горения в камере сгорания, происходящие в межрубашечном пространстве и в жаровой трубе. По результатам расчета сделан анализ о структуре потока в области жаровой трубы, распределение потоков воздуха

*Р.Р. Халиулин, steel-toreto@mail.ru

по объему жаровой трубы, т.е. коэффициента избытка воздуха. Расчеты показывают распределение температуры, скоростей и векторную картину течения в исследуемых областях сгорания.

В результате проделанной работы выявлены следующие особенности в разрабатываемой камере сгорания:

1. Втекание струй воздуха в жаровую трубу - навстречу потоку газов внутри жаровой трубы;
2. Формирование течения в первичной зоне с тангенциальной подачей струй воздуха через завихритель;
3. Взаимодействие продуктов сгорания, выходящих из первичной зоны со струями воздуха первого пояса отверстий.

Данная камера сгорания испытана в составе теплогенераторной установки для подогрева на рабочем режиме при суммарном коэффициенте избытка воздуха $\alpha_2 = 3,6$. По результатам испытаний температура на выходе из камеры сгорания составила $T = 1030$ К, такая же температура на выходе из камеры сгорания получена по результатам численных расчетов, что говорит о практически полном сгорании топлива (полнота сгорания $\eta = 0,95-0,96$).

Список литературы

1. **Халиулин Р.Р.** Исследование камеры сгорания для установки по обогреву уличных коммуникаций / Халиулин Р.Р., Давыдов Н.В., Юсеф В.М. и др. // Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы - 2017 (МНТК «ИМТОМ-2017»). Материалы VIII Международной научно-технической конференции. 2017. С. 380 - 382.

R.R. Khaliulin, N.V. Davydov, W.M. Yousef, Seyid Jafari S.S.

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI,
420111 Russian Federation, Tatarstan, Kazan, K. Marksa st., 10

FLOW IN THE COUNTERFLOW COMBUSTOR OF THE HEAT GENERATOR

К.М. Моисеева¹, А.Ю. Крайнов¹

¹Томский государственный университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 36*

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ РЕАКЦИОННОСПОСОБНЫХ ГАЗОВ И ГАЗОВЗВЕСЕЙ В УЗКИХ КАНАЛАХ

В докладе представлены результаты численного исследования особенностей распространения пламени по реакционноспособному газу или газозвеси в условиях узкого канала. Представлены результаты исследований горения метановоздушной и пропановоздушной смеси с составом близким к стехиометрическому и газозвеси угольной пыли в метановоздушной смеси.

Постановка задачи основана на физико-математических моделях [1, 2] и учитывает процессы тепломассопереноса и химического реагирования в реакционноспособной смеси. Уравнения физико-математической модели записываются в цилиндрической системе координат в консервативной форме. Метод решения задачи основан на [3, 4].

Для пропановоздушных смесей с составом близким к стехиометрическому показано формирование искривленного пламени. Проанализировано влияние ширины канала на формирование искривленного тильпанообразного фронта. Пример полученных результатов представлен на рис. 1.

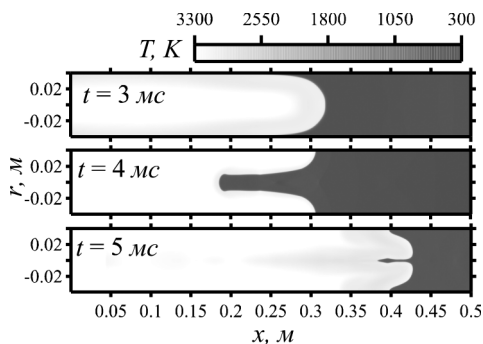


Рис. 1. Распределение температуры пропановоздушной смеси с объемной долей пропана 4 %

* К.М. Моисеева, Moiseeva_KM@t-sk.ru

Для метановоздушных смесей подобной неустойчивости в численном решении не наблюдается. Проанализировано влияние стенок канала на динамику распространения фронта пламени. Показано, что расширение газа в сторону стенок приводит к ускорению пламени на начальном этапе развития горения.

Показано влияние частиц угольной пыли на форму пламени и скорость распространения горения углеметановоздушной смеси. Показан механизм формирования фронта горения газовзвеси. Показано, что скорость распространения пламени имеет несколько экстремумов, связанных с газодинамикой течения газовзвеси.

Наблюдаемые в исследовании результаты качественно соответствуют работе [5].

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда 21-71-10034.

Список литературы

1. **Моисеева К.М., Крайнов А.Ю.** Численное определение критических условий искрового зажигания и выхода на устойчивый режим горения бедной метановоздушной смеси // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2018. № 56. С. 79 – 87.
2. **Кангарбаева А., Моисеева К.М.** Особенности распространения пламени в угле-пропано-воздушной газовзвеси // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2021. № 74. С. 95 – 102.
3. **Van Leer B.** Towards the ultimate conservative difference scheme. Second-order sequel to Godunov's method // J. Comput. Phys.. 1979. V. 32. №. 1. P. 101 – 136.
4. **Крайко А.Н.** О поверхностях разрыва в среде, лишенной 'собственного' давления // ПММ. 1979. Т. 43. № 3. С. 500 – 510.
5. **Shen X., He X., Sun J.** A comparative study on premixed hydrogen-air and propane-air flame propagations with tulip distortion in a closed duct // Fuel. 2015. V. 161. Pp. 248 – 253.

K.M. Moiseeva¹, A.Yu. Krainov¹

¹ Tomsk State University,
Russia 634050 Tomsk, Lenina, 36

NUMERICAL INVESTIGATION OF COMBUSTION OF REACTIVE GASES AND GAS SUSPENSIONS IN NARROW CHANNELS

Г.А. Колегов¹, К.М. Моисеева¹, А.Ю. Крайнов¹

¹Томский государственный университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 36*

РАСЧЕТ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С УЧЕТОМ ГОРЕНИЯ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ

При определении характеристик взрывобезопасности горных выработок необходимо проводить предварительное моделирование аварийных ситуаций. В частности, требуется определять взрывобезопасные расстояния при внезапных аварийных взрывах метана и возникновении ударных волн. В существующих рекомендациях учитывается только ударная волна от взрыва метана. В то же время накопившаяся на стенках выработки угольная пыль способна к подъему и последующему горению при прохождении ударной волны по выработке.

Для определения характеристик пожаровзрывобезопасности выработки может быть использована методика расчета, основывающаяся на данных о характеристиках испытаний угольной пыли на пожаровзрывоопасность. Из этих данных может быть определена нормальная скорость распространения волны горения угольной пыли выбранного состава. Эти данные могут быть использованы для расчета распространения ударной волны по выработке с учетом горения угольной пыли. Физико-математическая модель, реализующая подобную методику, представлена ранее в работе [1]. Метод решения основан на [2].

В настоящей работе представлены результаты исследования распространения ударной волны от аварийного взрыва метана, при подъеме и горении угольной пыли.

Для определения влияния сгорания угольной пыли в выработке (рис. 1) на интенсивность ударной волны взрыва метана были выбраны следующие варианты расчетов:

1. Распространение ударной волны от аварийного взрыва метана без учета подъема и горения угольной пыли.
2. Распространение ударной волны от аварийного взрыва метана с учетом подъема и горения угольной пыли.

Согласно полученным результатам при горении аэровзвеси угольной пыли давление в ударной волне выше, чем в случае, когда угольной пыли нет. Период времени действия повышенного давления в точках выработки существенно увеличивается (примерно в 4 раза).

*К.М. Моисеева, Moiseeva_KM@t-sk.ru

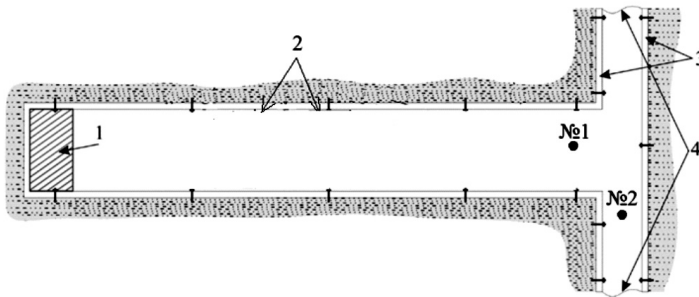


Рис. 1. Схема расположения подготовительной и сквозной выработок: 1 – область загазования метаном в подготовительной выработке; 2, 3 – крепление стен выработок; 4 – сквозная выработка

Согласно полученным результатам волна горения в аэровзвеси угольной пыли распространяется со скоростью примерно на порядок меньше, чем скорость распространения ударной волны. Влияние сгорания угольной пыли на интенсивность ударной волны дало повышение интенсивности ударной волны на 25-30 %.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда 21-71-10034.

Список литературы

1. Крайнов А.Ю., Лукашов О.Ю., Моисеева К.М., Колегов Г.А. Влияние горения угольной пыли на интенсивность ударной волны от аварийного взрыва метана в шахте // Уголь. 2022. № 9 (1158). С. 73 – 78.

2. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2015616516. «Ударная волна» / О.Ю. Лукашов, Д.Ю. Палеев, А.Ю. Крайнов. Правообладатель ООО «ШАХТЭКСПЕРТ-Системы» (RU). Заявка № 2015613051 от 17.04.2015; опубл. 11.06.2015.

G.A. Kolegov¹, K.M. Moiseeva¹, A.Yu. Krainov¹

¹ Tomsk State University,
Russia 634050 Tomsk, Lenina, 36

CALCULATION OF SHOCK WAVE PROPAGATION TAKING INTO ACCOUNT COAL DUST COMBUSTION

Д.Ю. Мальшев¹, М.С. Тамашевич¹

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

ВЛИЯНИЕ ВИДА ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ НА ВРЕМЕНА ЗАДЕРЖКИ ЗАЖИГАНИЯ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Нестабильность цен на углеводороды создает предпосылки для использования других источников энергии. Одним из наиболее перспективных видов топлива является уголь [1]. Последний имеет широкую распространенность (встречается практически на всех континентах), обладает относительной дешевизной, технологии его сжигания хорошо отработаны.

Проблема использования угля состоит в том, что процесс его сжигания сопровождается большими объёмами выбросов антропогенных газов в атмосферу Земли [2]. Одним из вариантов решения данной проблемы является сжигание угля в составе водоугольного топлива (ВУТ). Установлено, что при сжигании ВУТ зарегистрировано существенно снижение выбросов NO_x , SO_x [3]. Но, в тоже время, сжигание ВУТ сопряжено рядом проблем. Например, в связи с тем, что в составе топлива содержится порядка 50 % воды, время термической подготовки возрастает, и как следствие, возрастают и времена задержки зажигания (которые могут составлять несколько десятков секунд [4]). Решением же данной проблемы могут служить различного рода ускоряющие процесс зажигания добавки [5]. В качестве такой добавки может выступать биомасса.

В статье приведен анализ влияния добавления биомассы (опилки сосны) на времена задержки зажигания водоугольных топлив. Также определены оптимальные концентрации древесной биомассы в составе топлива в качестве ускоряющей процесс зажигания добавки.

Условия теплообмена экспериментальной установки соответствовали условиям, протекающим в типичных топках котельных агрегатов. Температура внутри печи варьировалась в достаточно широком диапазоне (873-1273 К).

Установлено, что добавление биомассы в состав топливного композита приводит к снижению времен задержки зажигания ВУТ. Добавление 6 % биомассы приводит в среднем к снижению времен задержки зажигания на 20 % по сравнению с ВУТ без добавок.

Исследование поддержано (2.0047.РНФ.2022 (РНФ 22-79-00223)).

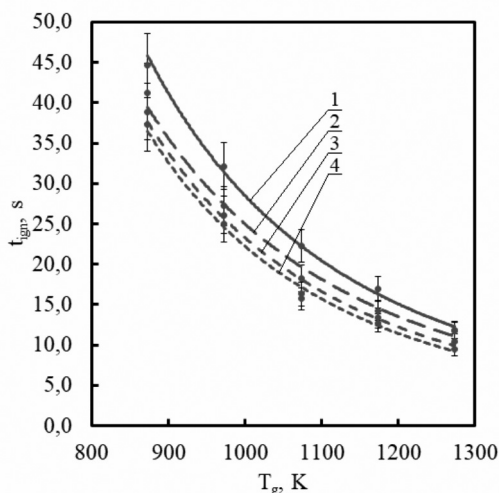


Рис. 1. зависимости времен задержки зажигания водоугольных топлив с добавлением опилок сосны от температуры окислительной среды при варьировании массовых концентраций биомассы: 1 – 0 %; 2 – 2 %; 3 – 4 %; 4 – 6 %

Список литературы

1. **Zhou J., Tabata T.** Economic, societal, and environmental evaluation of woody biomass heat utilization: A case study in Kobe, Japan // *Renewable Energy*. 2022. V. 188. P. 259 – 268.
2. **Израэль Ю.А.** Кислотные дожди / Ю.А. Израэль, И.М. Назаров, А.Я. Прессман. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 206 с.
3. **Делягин Г.Н.** Сжигание твердого топлива в виде водоугольных суспензий / Г.Н. Делягин, И.В. Давыдова. М.: ЦНИЭИ Уголь, 1969. 49 с.
4. **Syrodoy S.V.** The influence of the structure heterogeneity on the characteristics and conditions of the coal–water fuel particles ignition in high temperature environment / S.V. Syrodoy, G.V. Kuznetsov, A.V. Zhakharevich, N.Y. Gutareva, V.V. Salomatov. *Combustion and Flame*. 2017. V. 180. P. 196 – 206.
5. **Vershinina K.Yu.** Impact of environmentally attractive additives on the ignition delay times of slurry fuels: Experimental study / K.Yu. Vershinina, N.E. Shlegel, P.A. Strizhak // *Fuel*. 2019. V. 238. P. 275 – 288.

D.Yu. Malyshev¹, M.S. Tamashevich¹

National Research Tomsk Polytechnic University
Tomsk, 634050, Lenin Ave., 30

INFLUENCE OF THE TYPE OF WOODEN BIOMASS ON THE IGNITION DELAY TIMES OF WATER-COAL FUEL

А.В. Бикмулин, П.Г. Бобылев, В.М. Проскурин, В.Ю. Митяков,
 Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

ВЛИЯНИЕ РАСХОДА ОКИСЛИТЕЛЯ НА МЕСТНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА ОТ ДИЗЕЛЬНОЙ ГОРЕЛКИ OILON KP-6

Измерение местных значений плотности теплового при горении факела является единственным средством мониторинга, позволяющим оценить влияние различных факторов на процессы горения [1]. Измерения проводились при помощи охлаждаемого зонда с установленным на нем градиентным датчиком теплового потока (рис. 1).

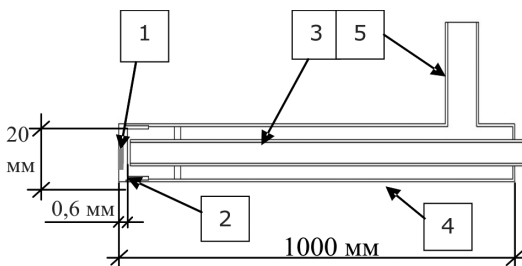


Рис. 1. Схема измерительного зонда:

1 – ГДТП; 2 – латунная пята; 3 – труба для подачи воды;
 4 – внешний кожух; 5 – патрубок отвода воды

Комбинация датчика и измерительного зонда доказала свою работоспособность в серии лабораторных и промышленных экспериментах [2].

В отличие от термометрии измерения производятся без внесения возмущений в факел. Зонд располагается на визуальной границе факела и позволяет измерять как усреднённые по времени, так и мгновенные значения плотности теплового потока.

В работе рассмотрен режим горения с расходом дизельного топлива 7,95 кг/ч при расходе воздуха 245, 210 и 153 кг/ч. Подачу воздуха с коэффициентом избытка окислителя $\alpha = 1,32 \dots 2,12$ реализовывали при помощи заслонки, предусмотренной конструкцией горелки OILON KP-6.

Измеренные плотности теплового потока по длине факела представлены на рис.2.

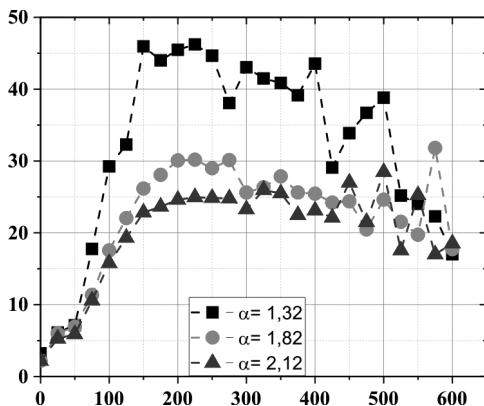


Рис. 2. Распределение местной плотности теплового потока по длине пламени X , в зависимости от избытка окислителя α при расходе топлива $G = 7,95$ кг/ч

На рис. 2 видно, что при подаче различного количества воздуха тепловыделения в области «холодного» горения и хвостовой части близки на всех режимах. Различие наблюдается лишь в области интенсивного горения. Оптимальный расход воздуха составляет 153 кг/ч ($\alpha = 1,32$). При большем снижении расхода нарушается форма факела: хвостовая часть изгибается. Применение в этом эксперименте газоанализатора testo 330 i подтвердило, что этот режим наиболее экологичный.

Список литературы

1. **Duda P.** A new method for identification of thermal boundary conditions in water-wall tubes of boiler furnaces / P. Duda, J. Taler // Int J Heat Mass Transf 52:1517 – 1524, 2009.
2. **Bobylev P.G.** Gradient Heatmetry in a Burners Adjustment / P.G. Bobylev, A.V. Pavlov, V.M. Proskurin, Y.V. Andreyev, V.Y. Mityakov, S.Z. Sapozhnikov // Inventions 2022, 7, 122.

A.V. Bikmulin, P.G. Bobylev, V.M. Poroskurin, V.Yu. Mityakov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Russia 195251, St.Petersburg, Polytechnicheskaya, 29

INFLUENCE OF OXIDIZER CONSUMPTION ON LOCAL VALUES OF HEAT FLUX FROM OILON KP-6 DIESEL BURNER

СРАВНЕНИЕ СТРУКТУРНО-ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОДИСПЕРСНОГО ПОТОКА ДЛЯ РЕЖИМОВ ГОРЕНИЯ И ГАЗИФИКАЦИИ

Происходящие в процессе конверсии изменения структурных характеристик потока с общей тенденцией к снижению объемной плотности ρ и увеличению порозности ϵ , вызывают изменение гидромеханических сил и могут сопровождаться переходом от режимов с высококонцентрированными потоками к низкоконцентрированным.

Целью работы является сравнение значений порозности потока при различных давлениях. Расчет проводится для двух режимов: полного сжигания и безостаточной газификации. Для исследования выбраны антрацит (Донецкий АШ) и древесина (сосна). Топливные характеристики взяты по нормативным данным.

Массовая концентрация топливных частиц в исходной смеси рабочего состава задается по стехиометрическим соотношениям топливо-воздух:

$$\mu_0 = \frac{1}{L^{0г}} \equiv \frac{1}{V^0 \cdot \alpha_{ст} \rho_B^0} \left[\frac{\text{кг топлива}}{\text{кг воздуха}} \right]. \quad (1)$$

Порозность ϵ потока топливных частиц в исходной топливо-воздушной смеси с массовой концентрацией μ_0 найдется из выражения:

$$\epsilon_0 = \frac{\rho_T^0 \cdot L^{0г}}{\rho_T^0 \cdot L^{0г} + \rho_T^0} \equiv \frac{\rho_T^0 \cdot \alpha_{ст} \cdot V^0}{1 + \rho_T^0 \cdot \alpha_{ст} \cdot V^0}. \quad (2)$$

Для полного горения стехиометрический коэффициент расхода воздуха равен 1. Для безостаточной газификации стехиометрические коэффициенты расхода воздуха на конверсию горючей массы на двухатомные газы H_2 и CO находятся по формуле (3) и составляют 0,467 для антрацита и 0,185 для древесины.

*И.Д. Суворин, suvorin.ig@yandex.ru

$$\alpha_{ст} = \frac{L_{гф}^0}{L_{гор}^0} = \frac{n-1}{2 \cdot n + 0,5 \cdot m - l} \quad (3)$$

Результаты расчета порозности в потоке при стехиометрическом расходе воздуха для двух режимов представлены на рис. 1.

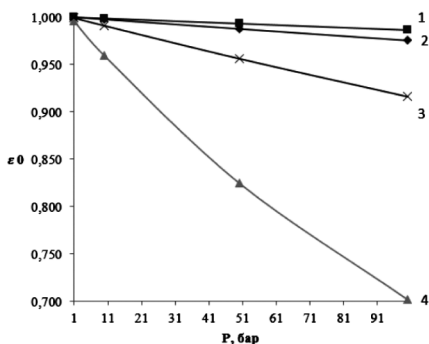


Рис. 1. Зависимость порозности потока топливных частиц в исходной смеси от давления:
 1 – горение (антрацит);
 2 – газификация (антрацит);
 4 – газификация (древесина)

График показывает, что с увеличением давления порозность в обоих режимах уменьшается. Антрацит переходит в режим быстрого кипящего слоя только при высоких давлениях (100 бар для полного горения и свыше 50 бар для газификации). В остальных случаях наблюдается состояние разбавленного ($\epsilon_0 > 0,9997$) и плотного пневмотранспорта ($\epsilon_0 \geq 0,99$). Для древесины при полном горении при давлениях менее 10 бар и для режима газификации при давлении 1 бар наблюдается режим пневмотранспорта. В остальных случаях для древесины наблюдается режим быстрого кипящего слоя.

Благодарности. 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».

I.D. Suvorin^{1,2}, *A.F. Ryzhkov*¹, *L.V. Simbiryatin*³

¹ Ural Federal University the first President of Russia B. N. Yeltsin,
 Russia 620002 Ekaterinburg, Mira, 19

² PLM Ural Group of Companies,
 Russia, 620131 Ekaterinburg, Metallurgov, 16 B

³ LLC «Industrial Perlite»,
 Russia, 620072 Ekaterinburg, Vladimira Vysockogo, 46

COMPARISON OF THE STRUCTURAL-DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE GAS-DISPERSIVE FLOW FOR VARIOUS FUEL STATES

О.В. Комова, А.И. Гурьянов

ФГБОУ ВО Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьёва,
152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, д. 53

ЭМИССИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ВОДОРОДСОДЕРЖАЩЕГО ТОПЛИВА В ПРОТИВОТОКЕ В ОБЛАСТИ СВЕРХБЕДНЫХ РЕЖИМОВ

Экологические требования являются одними из основных требований, предъявляемых к камерам сгорания газотурбинных установок. Среди основных химических соединений, образующихся в зоне горения является группа оксидов NO_x , монооксид углерода CO и несгоревшие углеводородные компоненты C_xH_y . При переходе в область бедного горения снижается температура во фронте пламени, тем самым уменьшается скорость образования NO_x . Однако при этом возникает проблема существенного снижения полноты сгорания топлива и рост эмиссии CO и несгоревших углеводородов C_xH_y .

В рамках выполненного исследования горения топливных смесей метана с многокомпонентным водородсодержащим топливом (МВТ) в противоточном горелочном устройстве (ПГУ) выявлен эффект влияния добавок МВТ на эмиссионные характеристики горения.

Максимальная концентрация NO_x в продуктах сгорания имеет место вблизи области стехиометрического горения. При отклонении в область бедного горения уменьшаются значения температуры горения, что сопровождается существенным снижением концентрации NO_x в продуктах сгорания до значений C_{NO_x} менее 3 ppm в диапазоне коэффициентов избытка воздуха $1,5 < \alpha_{\text{max}} < 2,3$ в режиме «бедного» горения.

Было установлено, что объемная доля добавки МВТ 15 % позволяет сократить эмиссию NO_x при горении в условиях ПГУ в 1,5 раза относительно горения метана во всём диапазоне по коэффициенту избытка воздуха. Это подтверждает целесообразность применения топливных смесей метана с МВТ для снижения эмиссии оксидов азота NO_x [1].

Перевод противоточного горелочного устройства с метана на МВТ сопровождается уменьшением эмиссии CO и C_xH_y для коэффициента избытка воздуха в области бедного горения до $\alpha = 5$.

При горении МВТ в области сверхбедных составов смеси $5 < \alpha < 18$ наблюдается значительное увеличение концентрации CO и C_xH_y . При этом

в диапазоне α от 5 до 7 концентрация C_xH_y растёт монотонно, а при $\alpha = 7$ начинается лавинообразный рост концентрации несгоревших углеводородов при дальнейшем «обеднении» смеси и приближении к границе «бедного» срыва пламени. В области сверхбедных смесей горение углеводородов практически прекращается, а тепло экзотермической реакции, обеспечивающее устойчивость горения, выделяется при окислении водорода, входящего в состав МВТ.

Аналогичным образом в сверхбедной области ведёт себя зависимость концентрации СО от коэффициента избытка воздуха α . При ≈ 13 происходит «остановка» реакции окисления СО до СО₂.

Экспериментальные исследования противоточного горелочного устройства на МВТ подтвердили возможность организации сверхбедного горения и обеспечения температуры продуктов сгорания на выходе из ПГУ. В диапазоне режимов сверхбедного горения при увеличении α от 4 до 14, температура газов на выходе уменьшается от 1250 °С до 600 °С. При этом режим горения в ПГУ является устойчивым без пульсаций температуры и возникновения механизмов виброгорения.

Работа выполнена в рамках гранта РФФ 22-29-20220.

Список литературы

1. **Guryanov A.I. et al.** An experimental study of syngas combustion in a bidirectional swirling flow, International Journal of Hydrogen Energy. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.11.004>

O.V. Komova, A.I. Gur'yanov

Soloviev Rybinsk State Aviation Technical University,
Russia, Rybinsk, Pushkina, 53

EMISSION CHARACTERISTICS OF THE BURN OF MULTICOMPONENT HYDROGEN-CONTAINING FUEL IN THE COUNTERFLOW IN THE REGION OF ULTRA-POOR MODES

*С.В. Бусыгин, В.Н. Ковальногов, Д.А. Генералов, В.В. Сапунов,
Р.В. Федоров, И.И. Шепелев*

Ульяновский государственный технический университет,
432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВ В ЭНЕРГОУСТАНОВКАХ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ЭМИССИИ NO_x В ПАРОВЫХ КОТЛАХ

Введение. В настоящее время в Российской Федерации является актуальной решение проблемы по снижению негативного воздействия на окружающую среду. Так, при периодически нарастающих требованиях к эмиссии вредных веществ с уходящими газами котлов ТЭС и котельных, для энергетического оборудования разрабатываются режимные и технические мероприятия. Важной задачей при внедрении новых технологий (или усовершенствовании уже реализованных) на действующем оборудовании, в рамках решения сформулированной выше проблемы, является задача по поддержанию высокой эффективности использования органического топлива.

В связи с дороговизной натуральных исследований, а в ряде случаев с невозможностью их проведения, отрабатывать внедрение устройств по снижению негативного воздействия на окружающую среду позволяют инструменты математического моделирования.

Вычислительный эксперимент имеет ряд следующих преимуществ: возможность исследования нереализуемых, сложно реализуемых или мало изученных на практике процессов; возможность исследования объекта без его натурной модификации или доработки; возможность исследования каждого фактора в отдельности.

Комплекс программ для численного исследования устройств. Данный комплекс, при достаточной его проработке в части модификации конечно-разностного метода для моделирования, позволяет повысить качество вычислительного эксперимента, снизить объем затраченного ресурса ЭВМ и трудозатрат исследователя в части работы с интерфейсом отдельных компонентов комплекса.

Основной комплекс программ для численного исследования устройств является таблица исходных данных, заполняемой исследователем, с которой взаимодействует каждое автономное ядро комплекса.

*С.В. Бусыгин, sergey18.06.95@mail.ru

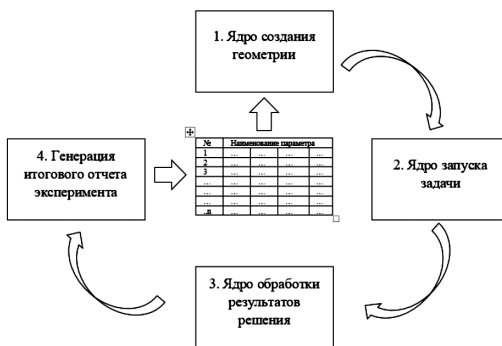


Рис. 1. Структура оригинального программного комплекса

Численное исследование. Исследование процессов горения природного газа в репрезентативном прототипе с реализацией устройств по снижению эмиссии NO_x , представляется в визуальном виде с графическим представлением результатов вычислительного эксперимента.

В работе также исследование влияния рециркуляции дымовых газов на восстановление оксидов азота. Подача дымовых газов в камеру сгорания через горелки, смешанные с воздухом, является важным средством снижения выбросов оксидов азота и находит новые области применения в системах сжигания топлива. Результатом работы стало установление зависимости максимальной температуры в центре пламени от степени рециркуляции.

Работа выполнена при финансовой поддержке мегагранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение №075-15-2021-584).

Список литературы

1. **Блинов Е.А.** Топливо и теория горения. Раздел - подготовка и сжигание топлива: Учеб.-метод. комплекс (учебное пособие) / Е.А. Блинов. СПб.: Изд-во СЗТУ, 2007. 119 с.
2. **Бойко Е.А., Охорзина Т.И.** Котельные установки и парогенераторы (конструкционные характеристики энергетических котельных агрегатов): Справочное пособие «Промышленная теплоэнергетика» / КГТУ. Красноярск, 2003. 223 с.
3. **Пашков Л.Т.** Основы теории горения: учебное пособие / Л.Т. Пашков. М.: Московский энергетический институт, 2003. 136 с.

*S.V. Busygin, V.N. Kovalnogov, D.A. Generalov, V.V. Sapunov,
R.V. Fedorov, I.I. Shepelev*

Ulyanovsk State Technical University,
Russia 432027 Ulyanovsk, Severny Venec, 32

MODELING OF FUEL COMBUSTION PROCESSES IN POWER PLANTS TO REDUCE NO_x EMISSIONS IN STEAM BOILERS

*А.В. Шегуров, В.Н. Ковальногов, В.В. Шеркунов, Д.А. Карпов,
А.И. Куприянов, Н.Д. Гладилин*

Ульяновский государственный технический университет,
432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32*

ОПТИМИЗАЦИЯ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВ В ЭНЕРГОУСТАНОВКАХ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ ЭМИССИЙ

За последнее время потребность в тепловой и электрической энергии быстро увеличилась, что является основной проблемой для традиционных источников производства энергии. Из-за изменения экологических требований в энергетике, появилась серьезная задача, по исследованию и разработке новых нетрадиционных топлив для сжигания в энергоустановках. В 2015 году Российская Федерация подписала Парижское соглашение, в соответствии с которыми взяла на себя обязательства по уменьшению выбросов в атмосферу парниковых газов

В зависимости от состава топлива и условий горения важно контролировать и стремиться снижать содержание в уходящих газах пыли, оксидов серы, оксидов азота и продуктов химического и механического недожога. Поэтому одной из задач эксплуатации энергооборудования является разработка методов определения оптимального режима горения топлива, снижающего образование вредных веществ и минимизирующего выброс токсичных продуктов горения.

Увеличение стоимости топлива, в частности природного газа и угля требует снижения удельного расхода топлива на выработку тепловой и электрической энергии для электростанций, работающих на органическом топливе. В настоящее время в мире активно развивается ESG-подход, что делает технологии оптимизации процесса горения особенно важными для тепловых электростанций, поскольку именно ТЭС являются одними из основных источниками выбросов NO_x в атмосферу. Существует ряд мероприятий для сокращения эмиссии вредных веществ, например рециркуляция дымовых газов в топочную камеру является простейшим средством снижения температурного уровня и концентрации кислорода в зоне горения и успешно реализуется на предприятиях и тепловых электростанциях как России так Европы.

Актуальной является технология двухступенчатого сжигания топлива путем установки вторичных отверстий для подачи избыточного воздуха

*А.И. Куприянов, kupriyanov182000@mail.ru

ха над ядром факела, тем самым снижая образование термических выбросов NO_x .

В связи со значительными сложностями натуральных испытаний для отработки новых технических решений, особое место занимает численное моделирование процессов теплообмена и гидрогазодинамики в энергоустановках. В настоящее время с момента проведения первого вычислительного эксперимента появился широкий выбор прикладных инструментов для моделирования течения потоков жидкостей и газов, межфазных взаимодействий с учетом химической кинетики, в т.ч. таких как Ansys (Fluid/CFX), Star CCM+, Flow Vision CFD, EBSILON, SigmaFlame, Fire 3D и др.

В работе рассматривается способ снижения эмиссии NO_x при использовании цифровой модели парового котла ТГМЕ-464 с комбинированной газомазутной горелкой ГМУ-45, который используется на таких предприятиях как Ульяновской ТЭЦ-1, Чебоксарской ТЭЦ-2 и др. При использовании мультисциплинарной среды StarCCM+ производится моделирование сжигания различных газообразных топлив с оценкой содержания NO_x и CO_2 при различных нагрузках на котле.

Установлено, что на снижение эмиссии парниковых газов значительное влияние оказывает рециркуляция уходящих газов, технология двухступенчатого сжигания топлива, поскольку эти способы позволяют снижать температуру в ядре факела и добиться уменьшения выбросов NO_x в атмосферу при помощи режимных мероприятий без проведения значительной реконструкции котлоагрегата.

Работа выполнена при финансовой поддержке мегагранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение №075-15-2021-584).

Список литературы

1. **Блинов Е.А.** Топливо и теория горения. Раздел – подготовка и сжигание топлива: Учеб.-метод. комплекс (учебное пособие) / Е.А. Блинов. СПб.: Изд-во СЗТУ, 2007. 119 с.
2. **Пашков Л.Т.** Основы теории горения: учебное пособие / Л.Т. Пашков. М.: Московский энергетический институт, 2003. 136 с

*A. V. Shegurov, V.N. Kovalnogov, V. V. Sherkunov, D.A. Karpov,
A.I. Kupriyanov, N.D. Gladilin*

¹ Ulyanovsk State Technical University,
Russia 432027 Ulyanovsk, Severny Venec, 32

OPTIMIZATION OF FUEL COMBUSTION IN POWER PLANT TO REDUCE EMISSIONS

Д.В. Антонов¹, П.А. Стрижак¹

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 340506, г. Томск, пр. Ленина, д. 30

ФРАГМЕНТАЦИЯ И ЗАЖИГАНИЕ ЖИДКИХ БИОТОПЛИВ ПРИ РАЗНЫХ СХЕМАХ НАГРЕВА

В данной работе представлены результаты экспериментов, направленных на определение критических условий микро-взрывной фрагментации капель жидких биотоплив на основе воды, рапсового масла и биомассы при нагреве в высокотемпературной газовой среде. Исследование мотивировано отсутствием до настоящего времени экспериментальных данных о предельных условиях фрагментации капель биотоплив в режимах микро-взрыва и паффинга [1, 2]. Данные топлива все шире применяются в мире в качестве дополнительных и даже основных для снижения экологической нагрузки на окружающую среду со стороны энергетических предприятий, работающих на традиционных топливах (уголь, мазут, дизельное топливо) [3, 4]. Типичные видеокadres микро-взрывной фрагментации гетерогенных капель представлены на рис. 1.

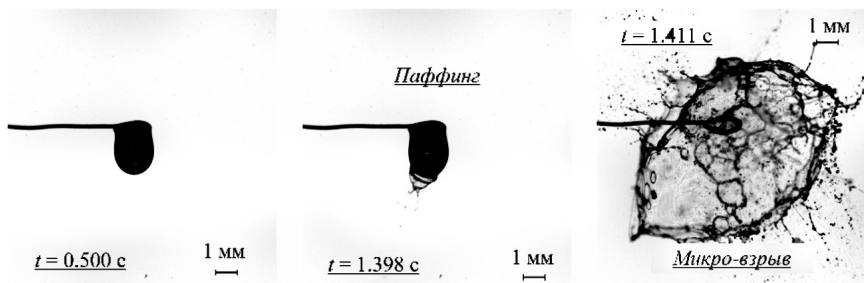


Рис. 1. Видеокadres микро-взрывной фрагментации гетерогенных капель на основе рапсового масла и дистиллированной воды

Особое внимание уделяется композициям на основе биомассы, которую по перспективности применения принято считать одним из лидеров в мировой сырьевой базе. Однако характеристики распыления таких топлив и вторичного измельчения капель в топочных камерах при высокотемпературном нагреве пока не установлены. Как следствие, настоящее исследование можно считать в определенной степени пионерским.

В рамках данного исследования удалось показать условия, при которых можно обеспечить стабильную микро-взрывную фрагментацию капель с целью получения мелкодисперсного аэрозоля. Таким образом, удалось обобщить применимость методик вторичного измельчения капель не только для композиций на базе традиционных горючих и легковоспламеняющихся жидкостей и воды, но и растительных масел и биомассы. Установлены диапазоны варьирования температуры, при которых стабильно реализуются режимы частичной фрагментации и полного микро-взрывного распада капель. Вычислены времена задержки фрагментации. Определено влияние концентрации компонентов в капле на условия фрагментации. Полученные экспериментальные данные позволили впервые выделить необходимые и достаточные условия интенсивной микро-взрывной фрагментации капель биотоплив. В дальнейшем целесообразно в развитие данной работы выполнить изучение последствий микро-взрывов капель исследованных топлив при разных внешних тепловых условиях с целью анализа возможности заполнения рабочей камеры сгорания топливным аэрозолем.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации (МД-1616.2022.4) и гранта РФФИ № 21-71-10008.

Список литературы

1. **Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A., Rybdylova O., Sazhin S.S.** Micro-explosion and autoignition of composite fuel/water droplets // *Combust. Flame*. 2019. 210. P. 479 – 489.
2. **Shinjo J., Xia J., Ganippa L.C., Megaritis A.** Physics of puffing and micro-explosion of emulsion fuel droplets // *Phys. Fluids*. 2014. 26. 103302.
3. **Watanabe H., Harada T., Matsushita Y., Aoki H., Miura T.** The characteristics of puffing of the carbonated emulsified fuel // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2009. 52. P. 3676 – 3684.
4. **Gaber C., Wachter P., Demuth M., Hochenauer C.** Experimental investigation and demonstration of pilot-scale combustion of oil-water emulsions and coal-water slurry with pronounced water contents at elevated temperatures with the use of pure oxygen // *Fuel*. 2020. 282. 118692.

D.V. Antonov¹, P.A. Strizhak¹

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
Russia 634050 Tomsk, Lenina avenue, 30

FRAGMENTATION AND IGNITION OF LIQUID BIOFUELS UNDER DIFFERENT HEATING SCHEMES

СЕКЦИЯ 4

**РАДИОЦИОННЫЙ, СЛОЖНЫЙ
И СОПРЯЖЕННЫЙ ТЕПЛООБМЕН
В ТОМ ЧИСЛЕ ДИСПЕРСНЫЕ
ПОТОКИ И ПОРИСТЫЕ СРЕДЫ**

В.С. Штелинг, В.В. Толмачев, А.Д. Соколова

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДИСПЕРГИРОВАННЫМ ПОТОКОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Для современной энергетики теплосъем с высокой плотностью энергии с каждым годом приобретает большую актуальность. При термостабилизации элементов экспериментальных термоядерных установок, современной силовой электроники, а также аэрокосмических систем требуемый уровень плотности отводимого теплового потока составляет 10 МВт/м^2 . Одновременно с этим возрастают требования к безопасности и энергоэффективности жидкостного охлаждения. Создание высокого давления в контуре теплоносителя требует значительных энергетических затрат и повышает опасность повреждения системы. В таких условиях одним из наиболее перспективных методов является термостабилизация энергонагруженных элементов диспергированным потоком теплоносителя, позволяющий обеспечить низкие значения давления в системе охлаждения, являющийся при этом наиболее эффективным среди методов жидкостного охлаждения [1].

Экспериментальные исследования диспергированного охлаждения имеют большую актуальность, о чем сообщают современные обзорные статьи [2]. На эффективность диспергированного охлаждения влияет множество факторов таких как эволюции диспергированного потока в процессе движения, временем взаимодействия диспергированного потока с поверхностью, образованием турбулизированной кипящей пленки жидкости и ее свойства.

Целью данной работы является исследование термостабилизации диспергированным потоком воды высокотемпературной поверхности на экспериментальном стенде, моделирующем энергонагруженные элементы термоядерных установок. Подробное описание конструкции экспериментального стенда и экспериментальной методики приведено в [3].

Конструкция экспериментального стенда была модернизирована, что позволило увеличить диапазон режимных параметров теплоносителя расход теплоносителя $G = (4,6 - 12,2) \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$ при давлениях $p = (1,5 - 15) \cdot 10^5 \text{ Па}$. Были проведены исследования на всем представленном диапазоне режимных параметров, часть результатов которых представлена на рис. 1 – зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока. Модернизация

рабочего участка позволила обеспечить плотность отводимого теплового потока $q = 10 \text{ МВт/м}^2$, при этом коэффициент теплоотдачи достигал значений $\alpha = 230 \text{ кВт/м}^2 \cdot \text{К}$.

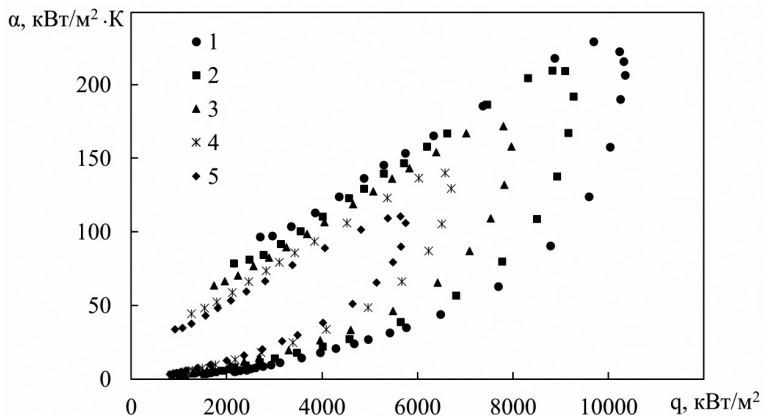


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока:

- 1 – $p = 15 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $G = 12,2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$, 2 – $p = 8,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $G = 9,3 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$,
 3 – $p = 5,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $G = 7,6 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$, 4 – $p = 3,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $G = 5,6 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$,
 5 – $p = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $G = 4,0 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$

Работа выполняется при поддержке гранта РФФИ №21-79-10179

Список литературы

1. **Liang G., Mudawar I.** Review of spray cooling. Part 1: Single-phase and nucleate boiling regimes, and critical heat flux // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2017. V. 115. P. 1174 – 1205.
2. Spray cooling and flash evaporation cooling: The current development and application / Wen-Long Cheng, Wei-Wei Zhang, Hua Chen, Lei Hu // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – Vol. 55. – pp. 614-628.
3. Экспериментальное исследование эффективности термостабилизации стенки диспергированным потоком / В.С. Штелинг, А.В. Дедов, А.В. Захаренков [и др.] // *Теплоэнергетика*. 2022. Т. 12. № 12. С. 54 – 63.

V.S. Shteling, V.V. Tolmachev, A.D. Sokolova

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,
 Russia, 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya, 14

INVESTIGATION OF THE THERMAL STABILIZATION OF A HIGH-TEMPERATURE SURFACE BY A DISPERSED COOLANT FLOW

В.П. Зинкевич¹

¹ Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)
125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4*

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА В ЭКРАННО-ВАКУУМНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

В состав систем обеспечения теплового режима космического аппарата нередко входит экранно-вакуумная теплоизоляция (ЭВТИ). Некоторые параметры этой системы невозможно измерить напрямую, что ведет к необходимости тепловакуумных испытаний и последующей обработки экспериментальных данных с помощью решения обратных задач теплопроводности [1]. Сложность такого анализа тепловых процессов, особенности ЭВТИ, а также дороговизна экспериментальной отработки требуют наличия математической модели теплоизоляции, описывающей не идеальную, а реальную систему.

На локальные характеристики пакета ЭВТИ оказывают сильное влияние технологические процессы и особенности закрываемой конструкции. В местах обжатия пакета, например, в области швов, перекрытий, существенно возрастают тепловые потери через теплоизоляцию [2]. Такое увеличение теплового потока может происходить не только за счет увеличения кондуктивной составляющей, но и за счет прироста радиационной составляющей теплового потока между телами при взаимодействии неоднородных электромагнитных волн вблизи поверхностей тел (экранов ЭВТИ) [3]. Степень черноты материалов при теплообмене в ближнем поле может превышать 100% даже между сильно отражающими металлическими поверхностями [4]. В таком случае увеличение теплового потока между экранами будет наблюдаться даже при отсутствии физического контакта между ними и без изменения кондуктивного теплового потока.

Тогда тепловой поток между соседними экранами ЭВТИ можно будет представить как сумму конвективной, кондуктивной и радиационной составляющих, где радиационная составляющая складывается из теплового потока в дальнем поле по классическому закону Стефана-Больцмана и теплового потока в ближнем поле. В существующих на данный момент математических моделях ЭВТИ высокой плотности отсутствует компонента радиационного теплообмена за счет неоднородных волн.

*В.П. Зинкевич, zvera95@list.ru

Величина теплового потока в ближнем поле зависит от ширины вакуумного зазора между телами. При ширине зазора меньше, чем характерная длина волны для рассматриваемых температур, теплоперенос осуществляется в основном неоднородными волнами [3, 5]. Следовательно, чем ниже температура, тем менее плотной должна быть укладка экранов теплоизоляции, чтобы избежать взаимодействия неоднородных волн. Аналогичная по своему характеру зависимость оптимальной плотности ЭВТИ от температуры продемонстрирована в исследовании [6], в котором теплоизоляция рассматривалась при температурах от 4 К до 300 К. В этой работе определено, что чем ближе экран теплоизоляции к холодной границе 4,2 К, тем более низкой должна быть плотность укладки отражающих экранов, которая достигается увеличением количества слоев сепаратора, а оптимальная плотность по толщине мата варьируется от 3,31 слоя/см (0,331 слоя/мм) до 19,98 слоя/см (1,998 слоя/мм).

Учет теплового потока в ближнем поле и плотности укладки экранов в математической модели приблизит модель ЭВТИ к реальной, а значит, упростит прогнозирование характеристик теплоизоляции на этапе проектирования и позволит извлекать максимум информации из результатов экспериментальной отработки.

Список литературы

1. **Alifanov, O.M., Nenarokomov, A.V., and Gonzalez, V.M.** Study of multilayer thermal insulation by inverse problems method // *Acta Astronautica*. 2009, 65. P. 1284 – 1291.
2. **Shun Okazaki, Haruo Kawasaki, Masahide Murakami, Hiroyuki Sugita, Yasuro Kanamori.** Influence of processing on thermal performance of space use multilayer insulation // *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. 2014. Vol. 28, No. 2. P. 334 – 342.
3. **Дмитриев А.С.** Введение в нанотеплофизику. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2019. 790 с.
4. **Nefzaoui E., Ezzahri Y., Drevillon J. and Joulain K.** Maximal near-field radiative heat transfer between two plates // *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 2013, 63. 30902.
5. **Liu X., Wang L., Zhang Z.M.** Near-Field Thermal Radiation: Recent Progress and Outlook // *Nanoscale and Microscale Thermophys. Eng.* 2015. Vol. 19. P. 98 – 126.
6. **Zhang C., Li C., Jia W., Pang Y.** Thermodynamic study on thermal insulation schemes for liquid helium storage tank // *Applied Thermal Engineering*. 2021. Vol. 195. 117185.

*V.P. Zinkevich*¹

¹ Moscow Aviation Institute (National Research University)
Moscow, 125993, Volokolamskoe highway, 4

ANALYSIS OF CHANGE IN HEAT FLUX DENSITY IN MULTILAYER THERMAL INSULATION UNDER MECHANICAL ACTION

Д.А. Некрасов^{1,2}, Н.С. Захаров^{1,2}, А.А. Мошин^{1,2}

¹ ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет»,
119454, г. Москва, пр. Вернадского, д. 78

² ФГБАУ ВО «Московский политехнический университет»,
107023, г. Москва, ул. Большая Семеновская, д. 38

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНЫХ СВОЙСТВ ГИДРОГЕЛЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Методами оптической голографии и градиентной теплотрии проведено экспериментальное исследование распространения полей температур при нестационарном нагреве гидрогелей. С помощью полученных зависимостей показателя преломления и видеокадров скоростной съемки определены количественные значения перепада температур между двумя интерференционными полосами исследуемых образцов гелевых материалов. В результате получены новые данные восстановленных значений полей температур для гидрогелей различной природы и концентрации, которые использовались для решения обратной задачи теплопроводности и определения коэффициентов переноса. Применение метода градиентной теплотрии позволило зафиксировать динамику изменения величины поверхностного теплового потока во времени и синхронизировать ее с результатами скоростной видеосъемки процесса нестационарного прогрева гидрогелевых образцов. Установлено, что в одинаковый момент времени и сопоставимой толщине прогретого слоя для различных гидрогелевых образцов, температура прогрева смешанного образца имеет максимальное значение по сравнению с чистыми гидрогелями.

На основе новых экспериментальных данных, а именно: полученных методом оптической визуализации полей температур, позволяющих существенно повысить точность обработки, разработана расчетная методика вычисления коэффициентов теплопроводности и теплоемкости исследуемых гелей при их прогреве.

При этом в отличие от ранее проведенных экспериментов [1,2], как с естественным охлаждением цилиндрических образцов гелей, так и с их нагревом, в которых контроль динамики изменения поля температур проводился с применением термопар и фактическим отсутствием возможности контролировать изменение теплового потока на всей поверхности образца реализованный способ тепловой диагностики гелей позволил существенно снизить влияние внешних факторов и управлять уровнем теплового воздействия в режиме реального времени.

Численные решения прямой и обратной задач, как и ранее, проводились с использованием программной среды Visual Fortran. Результатами расчетов являются значения коэффициентов теплопроводности и объемной теплоемкости некоторые значения которых приведены ниже:

Таблица 1

**Расчетные значения теплопроводности
и теплоемкости гидрогелевых материалов**

Тип вещества	λ , Вт/м · К	C , кДж/м ³
Желатиновый гель 4%	0,474	2059
Агарозный гель 0,4 %	0,495	2075

Таким образом расчетно-экспериментальный комплекс позволяет с высокой точностью восстанавливать теплофизические свойства гидрогелевых материалов, в том числе, с различными модифицирующими компонентами, что дает возможность применять описанные методики, например, для экспресс анализа свойств перспективных биочернил на их основе в широком диапазоне концентраций.

Список литературы

1. **В. Pokusaev, A. Vyazmin, N. Zakharov, S. Karlov, D. Nekrasov, V. Reznik, D. Khrantsov.** Non-stationary heat transfer in gels applied to biotechnology // Thermal Science. 2017. V. 21. No. 5. P. 2237 – 2246.

2. **Pokusaev B., Vyazmin A., Zakharov N., Karlov S., Nekrasov D., Reznik V., Khrantsov D.** The effect of bioresorbable additives and micro-bioobjects on gel formation and stabilization // Thermal Science. 2019. T. 23. № 2b. С. 1297.

D.A. Nekrasov^{1,2}, N.S. Zakharov^{1,2}, A.A. Moshin^{1,2}

¹ MIREA – Russian Technological University,
Russia, 119454 Moscow, pr. Verdanskogo, 78

²Moscow Polytechnic University,
Russia 107023 Moscow, ul. Bolshaya Semenovskaya, 38

**DETERMINATION OF THE HEAT-CONDUCTING PROPERTIES
OF HYDROGEL MATERIALS**

Ю.В. Вершинина, Н.Н. Павлушин

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ПРОТЕКАНИИ ВОДЫ ЧЕРЕЗ ШАРОВУЮ ЗАСЫПКУ

После катастроф, произошедших на ЧАЭС и АЭС Фукусима, требования к безопасности на АЭС повысились. Несмотря на всю перспективность проектов мирного использования атомной энергии, камнем преткновения для них становится вопрос безопасности использования ядерного топлива, его хранения и утилизации. С точки зрения обеспечения безопасности эксплуатации АЭС выделяется проект создания реактора на микроТВЭЛах.

МикроТВЭЛы благодаря своему строению препятствуют выходу радиоактивных отходов из оболочки. Однако для их эффективного использования требуется реактор, позволяющий их размещение в виде плотноупакованной шаровой засыпки. Шаровая засыпка обладает высоким коэффициентом гидравлического сопротивления, что усложняет построение схемы контура охлаждения реактора. Для развития идеи реактора, работающего на микроТВЭЛах, необходимо иметь надежные расчетные соотношения для определения потерь давления в шаровые засыпки.

Для учета потерь давления в шаровой засыпке при проведении численного моделирования обычно используется формула Эргуна:

$$\frac{\Delta p}{H} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu U_{\phi}}{d_{\text{ш}}^2} + 1,75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho U_{\phi}^2}{d_{\text{ш}}},$$

где ε – пористость шаровой засыпки; $d_{\text{ш}}$ – диаметр шарика; U_{ϕ} – скорость фильтрации жидкости.

Из формулы Эргуна можно записать выражения для вязкостного и инерционного коэффициентов сопротивления шаровой засыпки, которые обычно используются в программах для численного моделирования:

$$\alpha = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{1}{d_{\text{ш}}^2}; \quad \beta = 1,75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{1}{d_{\text{ш}}}.$$

Константы 150 и 1,75 в формуле Эргуна являются эмпирическими. В литературе представлены работы, в которых на основе теоретических и экспериментальных данных уточняются константы в формуле Эргуна.

В данной работе проведено численное моделирование течения через цилиндрическую шаровую засыпку на основе условий экспериментов [1]

с использованием стандартных значений констант 150 и 1,75 в формуле Эргуна, а также 245 и 1,02, полученных на основе данных работы [2]. Результаты моделирования представлены на рис. 1.

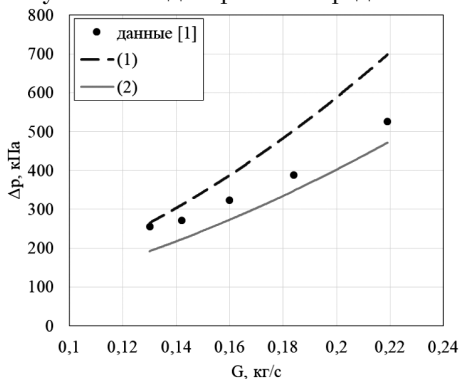


Рис. 1. Сравнение результатов моделирования с опытными данными [1]:
 (1) – результаты моделирование с константами 150 и 1,75;
 (2) – результаты моделирование с константами 245 и 1,02

Можно видеть, что результаты моделирования с стандартными константами в вязкостном и инерционном коэффициенте сопротивления являются существенно завышенными по сравнению с опытными данными, а результаты моделирования с константами, полученными на основе работы [2] несколько занижены, что представляется логичным, т.к. численное моделирование не учитывает дополнительные потери давления, например потери давления на решетках, удерживающих шаровую засыпку, которые вносят свой вклад в экспериментальные данные.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-4552.2022.4

Список литературы

1. **Авдеев А.А., Сознев Р.И.** Гидродинамическое сопротивление потока пароводяной смеси в шаровой засыпке // Теплофизика высоких температур. 2008. Т. 46. №. 2. С. 251 – 256.
2. **Smorchkova Yu.V., Varava A.N., Dedov A.V., Zakharenkov A.V., Комов А.Т.** The experimental determination of the coefficient of hydraulic resistance of a perforated plate with a layer of balls adjoining to it // Journal of Physics: Conference Series, 2017, Vol. 891. P. 012038.

Yu. V. Vershinina, N.N. Pavlushin

National research university «MPEI»,
 Russia, 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya 14, build 1

DETERMINATION OF RESISTANCE COEFFICIENTS FOR CALCULATION OF PRESSURE DROP DURING WATER FLOW THROUGH A PEBBLE BED

Ю.В. Вершинина, Г.А. Мишин, Х.Ю. Попандопуло

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА И ГИДРОДИНАМИКИ В ШАРОВЫХ ЗАСЫПКАХ С ВНУТРЕННИМ ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЕМ

Для экспериментального исследования теплообмена и гидродинамики в шаровых засыпках с внутренним тепловыделением в работе создан экспериментальный стенд, который включает в себя гидравлический контур, систему измерения, сбора и обработки информации, рабочий участок с шаровой засыпкой, систему высокочастотного индукционного нагрева для обеспечения внутреннего тепловыделения в шаровой засыпке. Стенд рассчитан на следующие режимные параметры: температура теплоносителя до 100 °С, давление теплоносителя до 2 МПа, расход теплоносителя (0,01 – 0,50) кг/с, мощность индукционного нагрева до 20 кВт. В качестве теплоносителя будут использоваться дистиллированная вода и инженерная жидкость Novac 7100.

Рабочий участок с шаровой засыпкой (рис.1) состоит из двух коаксиально расположенных трубок из поликарбоната (3,4). Внешняя трубка (3) стягивается фланцами из стеклотекстолита (1,9) с помощью четырех шпилек (6). Внутренняя трубка диаметром $D = 51$ мм состоит из четырех частей между которыми располагаются решетки с круглыми отверстиями диаметром 1,5 мм (2,5,8). Шарики диаметром 2,0 мм в виде свободной засыпки размещаются во внутренней трубке между решетками (5) и (8). Шарики изго-

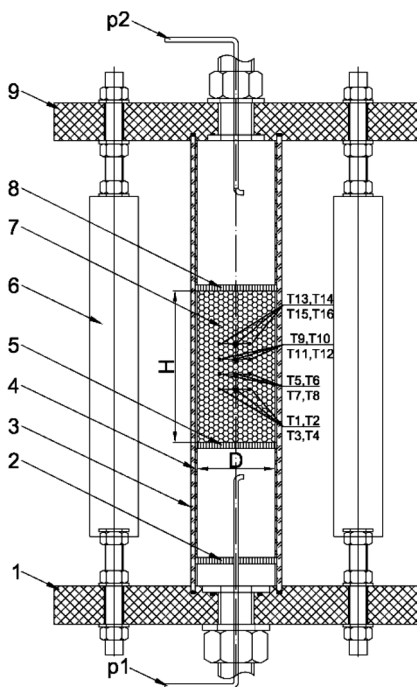


Рис. 1. Рабочий участок

товлены из стали марки AISI 420. Отборы давления (p_1 , p_2) изготовлены из капиллярной трубки диаметром 3 мм. Для измерения температуры теплоносителя и определения коэффициента теплоотдачи в рабочем участке размещено 16 термомпар, 8 из которых объединены в измерительные элементы (рис. 2). Элемент состоит из термомпары (2), которая заделывается в стенку шарика (1) и термомпары (3), которая располагается в жидкости в непосредственной близости от поверхности шарика. Термомпары жестко соединялись скруткой (4). В рабочем участке используются кабельные хромель-алюмелевые термомпары с диаметром кабеля 0,3 мм.

Первые экспериментальные данные получены на экспериментальном стенде при течении однофазного теплоносителя – дистиллированной воды для шаровой засыпки высотой 100 мм. Пористость засыпки в экспериментах составила 0,39. Экспериментальные данные представлены на рис. 3 в виде зависимости потерь давления от массовой скорости теплоносителя.

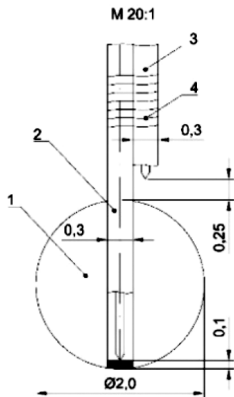


Рис. 2. Измерительный элемент для определения коэффициента теплоотдачи

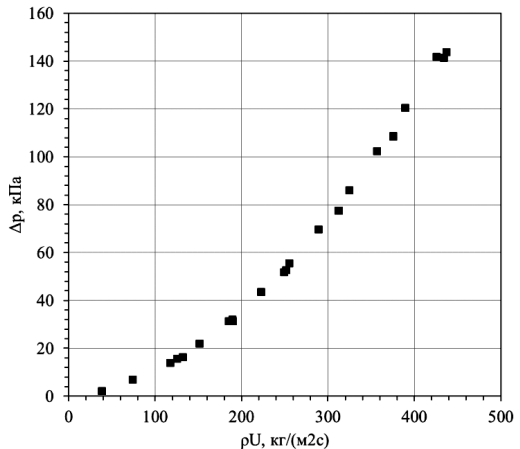


Рис. 3. Зависимость потерь давления от массовой скорости теплоносителя

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-452.2022.4.

Yu. V. Vershinina, G.A. Mishin, Kh. Yu. Popandopulo

National research university «MPEI»,
Russia, 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya 14, build 1

INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER AND HYDRODYNAMICS IN THE PEBBLE BED WITH INTERNAL HEATING

А.В. Абрамов¹, Д.О. Дуников^{1,2}

¹Объединенный институт высоких температур РАН,
111116, г. Москва, ул. Красноказарменная, дж. 17А

²Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В МЕТАЛЛОГИДРИДНОМ РЕАКТОРЕ ПРИ ПОГЛОЩЕНИИ ВОДОРОДА

Переход к низкоуглеродной энергетике предусматривает получение «зеленого» водорода за счет ВИЭ и использование энергетических смесей водорода и метана на основе существующей газовой инфраструктуры. Таким образом, возникает необходимость выделения водорода из смесей с CH_4 и/или CO_2 . Металлогидриды позволяют селективно поглощать и хранить водород в твердофазном связанном состоянии при температурах и давлениях, близких к нормальным условиям, а также эффективно сжимать и очищать водород [1,2].

Теплоперенос является основным лимитирующим фактором в металлогидридных устройствах, поскольку при поглощении водорода выделяется значительное количество тепла, которое необходимо эффективно отводить для обеспечения бескризисной работы. Поглощающий материал в активированном виде обычно представляет собой засыпку мелкодисперсного порошка с размером частиц порядка 1 – 10 мкм и низкой эффективной теплопроводностью (порядка 0,1 – 1 Вт/м К), зависящей от давления заполняющего газа и концентрации поглощенного водорода в частицах сплава. Расчет теплопереноса в металлогидридных устройствах, таким образом, является актуальной задачей.

Ранее нами была создана и реализована в среде COMSOL Multiphysics математическая модель процессов в металлогидридном реакторе [3], основанная на работах группы Г.Г. Янькова (НИУ МЭИ) при участии сотрудников ОИВТ РАН [4,5]. В таком реакторе водород либо содержащая водород смесь газов прокачивается через засыпку металлогидрида. Плотность частиц металла зависит от концентрации поглощенного водорода, при абсорбции водорода их размер увеличивается, в результате чего изменяются пористость и проницаемость засыпки. Этот эффект существенно влияет на процессы теплопереноса в металлогидридных устройствах. Задачей данной работы была модификация математической модели с учетом эффекта изменения проницаемости металлогидридной засыпки и ее верификация на основании экспериментальных данных по поглощению чистого водорода.

Математическая модель. Течение в свободном объеме реактора описывается уравнениями Навье-Стокса, а в пористой засыпке уравнениями Бринкмана (интерфейс COMSOL Multiphysics: Free and Porous Media Flow fp). Теплопередача описывается уравнением сохранения энергии, определяющим температуру в газовой (водород), пористой (металлогидрид) и твердой фазах (реактор), при этом твердая фаза моделируется в виде поверхностей (интерфейс Heat Transfer in Porous Media ht). Уравнение сохранения массы для металлогидридной засыпки, основано на кинетике реакций сорбции, равновесное давление рассчитывается на основе уравнения Вант-Гоффа и табличных аппроксимаций изотерм сплава (интерфейс Domain ODEs and DAEs dode).

В ходе данной работы выполнена экспериментальная верификация модели с использованием металлогидридного реактора РХО-8, содержащего 1 кг сплава $\text{La}_{0.9}\text{Ce}_{0.1}\text{Ni}_5$.

Работа выполнена при поддержке РФФ (проект 22-19-00516).

Список литературы

1. **Dunikov D., Borzenko V., Blinov D., Kazakov A., Lin C.Y., Wu S.Y., Chu C.Y.** Biohydrogen purification using metal hydride technologies // International Journal of Hydrogen Energy. 2016. Т. 41. № 46. С. 21787-21794.

2. **Dunikov D., Blinov D.** Extraction of hydrogen from a lean mixture with methane by metal hydride // International Journal of Hydrogen Energy. 2020. Т. 45. № 16. С. 9914 – 9926.

3. **Dunikov D.O., Borzenko V.I., Blinov D.V., Kazakov A.N., Romanov I.A., Leontiev A.I.** Heat and mass transfer in a metal hydride reactor: combining experiments and mathematical modelling // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Т. 2057. № 1. P. 012122.

4. **Артемов В. И., Лазарев Д. О., Яньков Г. Г., Борзенко В. И., Дуников Д. О., Мальшенко С. П.** Влияние неабсорбируемых газовых примесей на процессы тепломассообмена в металлогидридных устройствах для аккумуляции и очистки водорода // Теплофизика высоких температур. 2004. Т. 42. № 6. С. 972.

5. **Borzenko V.I., Blinov D.V., Dunikov D.O., Leontiev A.I.** Characteristic features of heat and mass transfer in hydrogen energy storage systems // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Т. 1128. № 1. P. 012126.

A.V. Abramov¹, D.O. Dunikov^{1,2}

¹Joint Institute for High Temperatures of RAS
Russia, 111116, Moscow, Krasnokazarmennaya, 17A

²National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
Russia, 111250 Moscow, Krasnokazarmennaya, 14

MODELING OF HEAT AND MASS TRANSFER IN A METAL HYDRIDE REACTOR DURING HYDROGEN ABSORPTION

А.Д. Голубков

Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН
119991, г. Москва, Ленинский пр., д. 53, стр. 4*

ГАЗОГЕНЕРАЦИЯ ПРИ ФОТОКАТАЛИЗЕ КАК МЕТОД УМЕНЬШЕНИЯ СИЛЫ ТРЕНИЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ МОТОРОВ НА МЕЖФАЗНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Задача создания миниатюрных роботов, которые способны двигаться на межфазной поверхности жидкость-газ при малых числах Рейнольдса, является чрезвычайным вызовом из-за доминирующей роли силы вязкости. Для решения этой проблемы сила трения может быть уменьшена за счет отгеснения жидкости от поверхности робота при химической газогенерации. Робот, в состав которого входили наночастицы оксида титана и ферромагнитные микрочастицы кобальта, двигался на межфазной поверхности водного раствора перекиси водорода под действием магнитной силы. За счет газогенерации на поверхности робота происходит отгеснение жидкости от поверхности робота. В работе предложена принципиально новая стратегия для преодоления силы трения, при движении роботов на поверхности жидкости. (рис. 1).

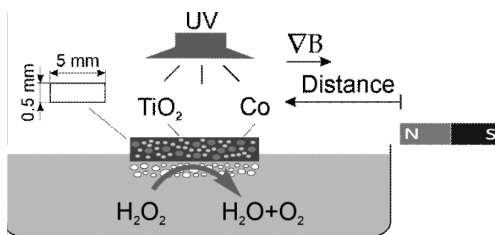


Рис. 1. Движение пловца при газогенерации на межфазной поверхности жидкость-газ

Движение микро- и наномоторов основывается на различных механизмах и принципах, связанных с протеканием химических реакций, воздействием света, электрического и магнитного поля, с помощью создания биогибридных роботов. При движении сокупности роботов они демонстрируют весьма необычные эффекты, связанные с коллективным взаимодействием. Широ-

* А.Д. Голубков, alexander_golubkov94@mail.ru

кий исследовательский интерес к проблеме микро- и наномоторов во многом обусловлен широким кругом прикладных задач, которые можно решать с их помощью в медицине, экологии, а также при создании сенсоров. Моторы могут двигаться как в однофазной среде, так и на межфазной границе. Для обозначения моторов, которые движутся на межфазной поверхности, обычно используется термин «*пловец*».

В данной работе предложен метод с помощью которого можно уменьшить силу трения, при движении миниатюрных пловцов на межфазной поверхности жидкость-воздух, за счет химического метода газогенерации. Пловец, в состав которого входили ферромагнитные частицы кобальта и частицы оксида титана, двигался под действием магнитной силы на поверхности раствора перекиси водорода. В результате протекания фотокаталитических реакций, при разложении перекиси водорода под действием оксида титана, на поверхности пловца формируется газовая каверна, заполненная кислородом. Благодаря оттеснению жидкости от поверхности робота, уменьшается действующую на него сила трения. В работе анализируются условия формирования газовой каверны. Полученные в работе результаты открывают принципиально новые возможности для управления силой трения, при движении миниатюрных роботов на межфазной поверхности жидкость-газ. Эти результаты могут использоваться при развитии новых методов сепарации материала на межфазной поверхности жидкость-газ.

Список литературы

1. Boris Kichatov, Alexey Korshunov, Vladimir Sudakov, Vladimir Gubernov, Alexandr Golubkov, Alexey Kiverin. Gas generation due to photocatalysis as a method to reduce the resistance force in the process of motors motion at the air-liquid interface. Journal of Colloid and Interface Science. 2022. Doi: 10.1016 / j.jcis.2022.07.073

A.D. Golubkov

P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences
Moscow, 119991, Leninsky prospekt, 53

GAS GENERATION DUE TO PHOTOCATALYSIS AS A METHOD TO REDUCE THE RESISTANCE FORCE IN THE PROCESS OF MOTORS MOTION AT THE AIR-LIQUID INTERFACE

С.В. Петрова^{1,2}, А.О. Городнов², И.В. Лантес²

¹ Московский физико-технический институт
(Национальный исследовательский университет),
141701, Долгопрудный, институтский переулок, д. 9

² АО ГНЦ «Центр Келдыша»,
125438, г. Москва, Онежская, д. 8

МОДЕЛЬ СОПРЯЖЕННОГО ТЕПЛООБМЕНА В РАКЕТНОМ БАКЕ ПРИ ОТБОРЕ ТОПЛИВА С ОДНОВРЕМЕННЫМ НАДДУВОМ

Разработка и оптимизация рабочих параметров современных топливных баков ракет ставит необходимость развития новых подходов к моделированию физических процессов внутри бака. При отборе топлива насосом, для поддержания давления внутри бака, в него подается газ. Зачастую газ наддува имеет температуру выше, чем топливо, поэтому его попадание в ёмкость с жидким компонентом может привести к интенсификации теплообмена внутри системы. Температура отбираемой из бака жидкости не должна превышать некоторого предельного значения, обусловленного требованием безкавитационной работы насоса. Во избежание локального вскипания в следствие прогрева остатков топлива, существует так называемый незабираемый остаток – некоторое количество топлива, которое не подается в насос, так как имеет более высокую температуру. Дополнительный прогрев топлива ведет к увеличению тепловых остатков незабора.

В данной работе предлагается физико-математическая модель процесса наддува топливного бака. В основе метода лежит рассмотрение по отдельности жидкой компоненты топлива, паровой подушки, сопряжение их через межфазную поверхность, также описание струи наддува и стенок бака.

В зависимости от того, каким веществом происходит наддув бака, паровая подушка может состоять как из паров жидкости, так и из стороннего газа. Будем считать, что пар и газ описываются уравнением состояния идеального газа. Давление в подушке полагается однородными. Температура подушки считается среднemasсовой. Таким образом, описание динамики параметров газовой подушки, можно выразить через уравнение теплового баланса

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[(m_v c_{pv} + m_g c_{pv}) T \right] = V \frac{\partial p}{\partial t} + G_{v(g)} T_{v(g)}^0 + G_s c_{pv} T_s - Q_{g-s} - Q_{g-w}$$

На границе раздела фаз предполагается локальное термодинамическое равновесие. Давление и температура на границе раздела связаны через кривую насыщения, которая задаётся уравнением Клайперона-Клаузиуса. Поверхность раздела считается плоской. На межфазной границе записывается уравнение теплового баланса.

$$Q_{vs} - Q_{st} = r_{vl} G_s.$$

Перенос тепла в жидкости описывается упрощенной моделью, приведённой в работе [2]. В работе [2] рассматривается модель на основе уравнения теплопроводности с заданным квадратичным профилем температур.

$$\rho_l c_l \frac{d(\theta_s \delta)}{dt} = 6\lambda_l \frac{\theta_s}{\delta}.$$

Для моделирования сложного трёхмерного течения струи наддува используется упрощенная модель эквивалентной струи, получаемая через введение площади трения [3]. Теплообмен между струей и стенками бака считается по эмпирической формуле, являющейся обобщением экспериментов по теплообмену струй наддува с жидкостью в баках.

$$Nu = 0,45 Re^{0,65}.$$

Дополнив приведённые соотношения уравнениями для массового баланса, изменения объёма и параметров смеси газов в подушке, можно получить замкнутую систему уравнений.

Была проведена верификация и валидация разработанной модели, показавшая адекватность выбранного подхода.

Список литературы

1. Черкасов С.Г., Лаптев И.В., Городнов А.О. Термодинамическая модель процессов в криогенных топливных баках // Космическая техника и технологии №2(29). 2020.

2. Черкасов С.Г., Миронов В.В., Миронова Н.А., Моисеева Л.А. Метод расчёта скорости роста давления при бездренажном хранении жидкого водорода в ёмкости // №4. Известия академии наук энергетика, 2012.

3. Абрамович Г.Н., Гиршович Т.А., Крашенинников С.Ю., Секундов А.Н., Смирнова И.П. Теория турбулентных струй. 1984

S.V. Petrova^{1,2}, A.O. Gorodnov², I.V. Laptev²

¹ Moscow institute of physics and technology, Dolgoprudnyy, Moscow region, Russia

² Keldysh Research Centre, Moscow, Russia

MODEL OF CONJUGATE HEAT TRANSFER IN A ROCKET TANK DURING THE SELECTION OF THE FUEL WITH SIMULTANEOUS PRESSURIZATION

В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Н.А.Шмакова

Вятский государственный университет,
610000, г. Киров, ул. Московская, д. 36 *

ОПЫТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ТОПОЧНЫХ ГАЗОВ В ПАРОВОМ КОТЛЕ ПРИ ФАКЕЛЬНОМ СЖИГАНИИ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ

Существующие методы измерения температуры продуктов сгорания при сжигании твердых топлив бесконтактным способом на данный момент не являются универсальными и их использование возможно только после предварительного изучения параметров энергоустановки, особенностей используемого топлива и спектра излучения топочных газов. Предварительно полученные результаты [1, 2] дают возможность определения излучательной способности (ИС) продуктов сгорания в зависимости от температуры.

В работе проведены пирометрические исследования температуры топочных газов в паровом котле БКЗ-210-140Ф при факельном сжигании торфа Кировской области и кузнечного угля. Измерения проводились с помощью пирометра Opttris CTlaser F2 в полосе излучения CO_2 ($\lambda = 4,24$ мкм) на разных высотах топки: $H = 9$ м (уровень горелок), 14 м (центральная часть факела) и 16 м (хвостовая часть факела). Получены зависимости температуры $T_{\text{экс}}$, регистрируемой пирометром, от установленной на нем ИС ε_λ в интервале $0,5 \div 1$ с шагом $\Delta\varepsilon_\lambda = 0,1$. Рассчитаны спектральные плотности потоков энергии излучения топочных газов, воспринимаемые пирометром, а также значения яркостных температур для соответствующих высот.

Истинная температура T топочных газов может быть определена по

формуле: $\frac{1}{T} = \frac{1}{T_{\text{я}}} + \frac{\lambda}{C_2} \ln \left[\varepsilon_\lambda + (1 - \varepsilon_\lambda) \cdot \exp \left(-\frac{C_2}{\lambda T_{\text{я}}} \right) \right]$, где $T_{\text{я}}$ – яркостная температура при заданной λ , $C_2 = 14388$ мкм; К – вторая постоянная формулы Планка; ε_λ – спектральная ИС при данной температуре.

Однако для однозначного определения температуры топочных газов, помимо температуры $T_{\text{я}}$, необходимо знать ИС ε_λ топочных газов на измеряемом участке факелы при сжигании конкретного топлива.

Для определения ε_λ использовалась разработанная нами программа «СПЕКТР», которая основана на решении уравнения переноса энергии излучения для излучающей, поглощающей и рассеивающей среды [1].

* И.А. Заграй, ZagrayIA@yandex.ru

Получены расчетные значения ε_λ топочных газов при изменении теоретической (заданной) температуры $T_{\text{теор}}$. Пересечение экспериментальной $\varepsilon_\lambda = f(T_{\text{эксп}})$ и расчетной $\varepsilon_\lambda = f(T_{\text{теор}})$ функций позволили определить действительные значения спектральной ИС ε_λ и температуры T топочных газов (рис.1).

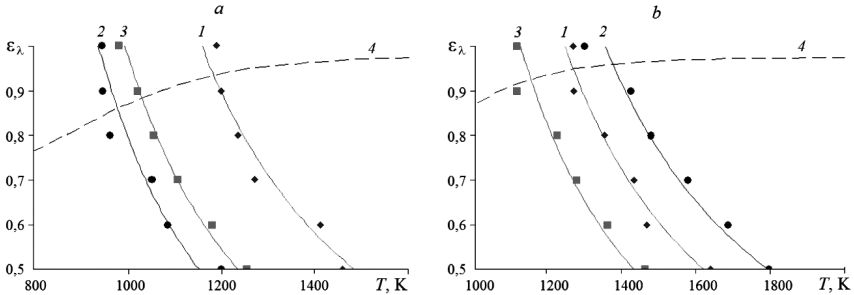


Рис. 1. Зависимости спектральной ИС от температуры при сжигании торфа (а) и угля (б): 1, 2, 3 – функции $\varepsilon_\lambda = f(T_{\text{эксп}})$ при $H = 9, 14$ и 16 м соответственно; 4 – расчетная функция $\varepsilon_\lambda = f(T_{\text{теор}})$

При сжигании торфа температуры составили: 1182 К, 978 К и 1031 К. При сжигании угля: 1268 К, 1375 К и 1154 К. Авторами разработана программа TEMPER [3], использующая пирометр Optris STlaser F2 для полосы излучения CO_2 , которая позволяет определять температуру и ИС топочных газов при факельном сжигании заданного вида твердого топлива.

Список литературы

1. Кузьмин В.А., Заграй И.А., Маратканова Е.И., Десятков И.А. Исследование теплового излучения топочных газов в паровом котле при сжигании твердых топлив // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26. № 2. С. 301 – 315.
2. Кузьмин В.А., Заграй И.А., Рукавишников Р.В. Тепловое излучение гетерогенных продуктов сгорания при сжигании торфа // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. № 3, 4. С. 58 – 67.
3. Свид. РФ № 2021667438 о государственной регистрации программы для ЭВМ / Temper: № 021667015: В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Н.А. Шмакова, А.Л. Адеков. Заявитель Вятский гос. ун-т. Заявл. 29.10.2021. Оpubл. 29.10.2021.

V.A. Kuzmin, I.A. Zagrai, N.A. Shmakova

Vyatka State University,
Russia, 610000 Kirov, Moscovskaya, 36

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL DETERMINING THE STEAM BOILER FURNACE GAS TEMPERATURE DURING FLAME COMBUSTION OF SOLID FUELS

ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИОННОГО ВРАЩЕНИЯ НА КОНВЕКТИВНО-РАДИАЦИОННЫЙ ТЕПЛОБМЕН В ПОЛОСТИ С ИСТОЧНИКОМ ЭНЕРГИИ

Задачи естественной конвекции являются распространенной областью исследований на сегодняшний день. Множество технологических процессов связано с производством тепловой энергии, требующей регулирования. Важной проблемой при этом является охлаждение нагреваемых рабочих узлов. В качестве интересной и практически полезной задачи можно рассмотреть особенности теплообмена в условиях вращения [1, 2]. Вращающиеся системы можно встретить при проектировании роторных теплообменников, электродвигателей, систем охлаждения электроники, при выращивании кристаллов. При решении таких задач может быть важным учет теплообмена механизмом излучения [3]. Часто вращающиеся системы подвержены неравномерному вращению, влияние которого рассмотрено в данной работе.

Предлагаемое исследование посвящено численному моделированию

конвективно-радиационного теплообмена в квадратной полости с источником тепловой энергии при воздействии неравномерного вращения. На рис. 1 продемонстрирована область решения, представляющая собой квадратную полость высоты H . Полость вращается вокруг оси, проходящей через центр области решения, с изменяющейся во времени по периодическому закону угловой скоростью ξ . Горизонтальные стенки полости теплоизолированы, в то время как вертикальные стенки поддерживаются при постоянной температуре охлаждения T_c . На нижней стенке полости находится нагревающийся источник тепловой энергии. Теплообмен излучением основан на приближении поверхностного из-

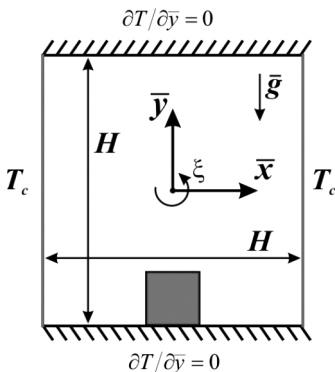


Рис. 1. Область решения

^{*}С.А. Михайленко, stepanmihaylenko@gmail.com

лучения. Внутренние поверхности полости и источника являются излучателями и отражателями тепловой энергии излучения. Полость заполнена несжимаемой ньютоновской жидкостью $Pr = 0,7$ прозрачной для излучения.

Основные уравнения движения жидкости и теплообмена сформулированы в преобразованных переменных «функция тока – завихренность – температура». Сформулированная система уравнений решена с помощью метода конечных разностей на равномерной сетке. Уравнение Пуассона для функции тока дискретизировано с использованием центральных разностей. Полученные уравнения были решены с использованием алгоритма последовательной верхней релаксации. Уравнения движения и энергии дискретизированы с помощью монотонной аппроксимации Самарского для конвективных слагаемых и центральных разностей для диффузионных слагаемых. Полученная система алгебраических уравнений решалась методом прогонки. Расчеты проведены с использованием собственного программного кода на языке C++.

Результаты моделирования конвективно-радиационного теплообмена в неравномерно вращающейся квадратной полости с источником тепловой энергии получены для широкого диапазона изменения определяющих параметров. Рассмотрено влияние коэффициента излучения поверхностей, а также режимов нагрева источника энергии и вращения полости. Рассмотрены распределения изолиний функции тока и температуры.

Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

Список литературы

1. **Banerjee S., Mukhopadhyay A., Sen S., Ganguly R.** Thermomagnetic Convection in Square and Shallow Enclosures for Electronics Cooling // Numerical Heat Transfer A. 2009. Vol. 55(10). P. 931 – 951.
2. **Howey D., Childs P., Holmes A.** Air-Gap Convection in Rotating Electrical Machines // Industrial Electronics, IEEE Transactions. 2012. Vol. 59. P. 1367 – 1375.
3. **Abraham J.P., Sparrow E.M.** Experiments on discretely heated, vented / unvented enclosures for various radiation surface characteristics of the thermal load, enclosure temperature sensor, and enclosure walls // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2002. Vol. 45. P. 2255 – 2263.

S.A. Mikhailenko, M.A. Sheremet

Tomsk State University, Russia, 634050, Tomsk, Lenin str., 36

INFLUENCE OF VIBRATIONAL ROTATION ON CONVECTIVE-RADIATIVE HEAT TRANSFER IN A CAVITY WITH AN ENERGY SOURCE

КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИХ ВОЗДУШНО-ПОРИСТЫХ СИСТЕМАХ С РАЗНЫМ ЧИСЛОМ ПОДСЛОЕВ

Уделяется внимание задаче конвективного тепло- и массообмена в системе, состоящей в общем случае из N тепло выделяющих пористых подслоев, расположенных горизонтально и разделенных воздушными прослойками. Толщина прослоек dH считается малой по сравнению с толщиной каждого из пористых подслоев δH и с толщиной всей системы H . На внешних границах воздушно-пористой системы задаются постоянные одинаковые температуры. Одно из приложений рассматриваемой проблемы – управление тепломассопереносом в объемах сельскохозяйственного сырья (зерна, корнеплодов, сена и др.) с целью поддержания оптимального режима его хранения. Биологически активное сырье способно выделять тепло, приводя при определенных условиях к возникновению естественной внутренней конвекции воздуха.

В случае, если пористые подслои имеют одинаковую проницаемость и толщину, конвекция в них носит характер крупномасштабного проникающего течения. Течение формируется в верхней половине системы, где воздух неустойчиво стратифицирован по плотности, а температура убывает с ростом вертикальной координаты. На рис. 1 приведены графики зависимости порогового внутреннего числа Релея-Дарси, при котором в системе появляется конвективное движение, от параметра прослойки ϵ для систем с разным числом пористых подслоев N . Параметр $\epsilon = d^3/(12Da)$ получается при решении уравнений конвекции в приближении Буссинеска в предельном случае малой толщины воздушных подслоев. Здесь Da – число Дарси или безразмерная проницаемость пористых подслоев. Из рис. 1 видно, что увеличивая толщину воздушного подслоя, можно добиться понижения порога возбуждения конвекции при каком-либо фиксированном числе пористых подслоев.

Почти двукратного понижения порога конвекции можно достичь, увеличивая число пористых подслоев, поскольку число прослоек и, соответственно, их влияние на устойчивость механического равновесия воздуха в системе также возрастает. Исключение составляет $N = 3$, когда прослойка воздуха разделяет области устойчивой и неустойчивой стратификации.

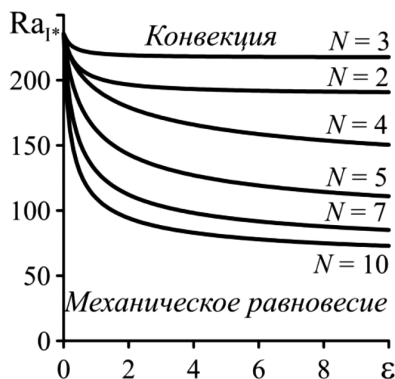


Рис. 1. Критическое внутреннее число Релея-Дарси, соответствующее порогу возбуждения конвекции, в зависимости от параметра прослойки ε для систем с разным числом пористых подслоев N

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-71-10045, <https://rscf.ru/project/21-71-10045/>.

Список литературы

1. Lisboa K.M., Su J., Cotta R.M. Single domain integral transform analysis of natural convection in cavities partially filled with heat generating porous medium // Numerical Heat Transfer Part A. 2018. <https://doi.org/10.1080/10407782.2018.1511141>.
2. Kolchanova E., Kolchanov N. Onset of internal convection in superposed air-porous layer with heat source depending on solid volume fraction: influence of different modeling // Acta Mechanica. 2022. V. 233. P. 1769 – 1788.
3. Shalhaf S., Noghrehabadi A., Assari M.R., Dezfuli A.D. Linear stability of natural convection in a multilayer system of fluid and porous layers with internal heat sources // Acta Mechanica. 2013. V. 224. P. 1103 – 1114.
4. Колчанова Е.А., Колчанов Н.В. Возникновение проникающей конвекции в трехслойной системе «пористая среда–воздух–пористая среда с внутренним тепловыделением» // Вычислительная механика сплошных сред. 2022. Т. 15. № 2. С. 160 – 170.

E.A. Kolchanova¹, N.V. Kolchanov¹

¹ Perm State University,
Russia 614990 Perm, Bukireva, 15

**CONVECTIVE HEAT AND MASS TRANSFER
IN HEAT-GENERATING AIR-POROUS SYSTEMS
WITH VARIOUS NUMBERS OF SUBLAYERS**

А.С. Гриненко¹

¹ Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет),
125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4*

АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК ПРИ СВЕРХОРБИТАЛЬНОМ ВХОДЕ ПИЛОТИРУЕМОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В АТМОСФЕРУ ЗЕМЛИ

Представлены результаты апробации предлагаемой методики проектирования для анализа эффективности практического применения различных геометрических форм экранов тепловой защиты лунного возвращаемого космического аппарата (КА).

Исходными данными для проектирования многослойного теплозащитного экрана КА является внешнее тепловое воздействие на аппарат, которое определяется баллистическими условиями.

В условиях сверхорбитального входа пилотируемого космического аппарата в атмосферу Земли принципиальными являются как конвективный механизм переноса энергии к поверхности КА, так и перенос энергии излучением. В настоящее время имеются развитые средства компьютерного моделирования конвективного и радиационного теплообмена. В их основу положены модели, содержащие уравнения движения вязкого, теплопроводного, химически и термически неравновесного излучающего газа [1-3]. Такой подход позволяет осуществлять детальное моделирование с учетом многообразия протекающих процессов и воздействующих факторов. Применение данного подхода к анализу сверхорбитального входа космического аппарата в атмосферу рассмотрено в работах [4, 5].

Конвективный теплообмен в наиболее полной постановке рассчитывается путем решения системы уравнений неразрывности для смеси в целом и для отдельных компонент, уравнений Навье–Стокса и уравнения сохранения энергии [1-3, 6]. Теплоемкость и переносные свойства компонент обычно рассчитываются по аппроксимационным зависимостям [7]. Для определения констант скоростей химических реакций в реагирующем газе часто используется модель Парка [8], где для определения этих констант в случае прямых и обратных реакций используется закон Аррениуса.

*А.С. Гриненко, Grinenko-aleksandr@mail.ru

Представлены результаты расчёта: траектории баллистического спуска аппарата для различных вариантов аэродинамических характеристик, конвективных и радиационных тепловых потоков в критических точках корпуса., что позволяет проанализировать принципиальную возможность создания неразрушаемой тепловой защиты для анализируемых аппаратов.

Работа была выполнена в рамках гранта РФФИ № 21-19-00683.

Список литературы

1. **Тирский Г.А., Сахаров В.И., Ковалёв В.Л., Егоров И.В. и др.** Гиперзвуковая аэродинамика и тепломассообмен спускаемых космических аппаратов и планетных зондов. М.: Физматлит, 2011.

2. **Viviani A., Pezzella G.** Aerodynamic and aerothermodynamic analysis of space mission vehicles. Springer International Publishing Switzerland, 2015.

3. **Суржиков С.Т.** Компьютерная аэрофизика спускаемых космических аппаратов. Двухмерные модели. М.: Физматлит, 2018.

4. **Суржиков С.Т.**, Радиационная газовая динамика лобовой поверхности командного модуля Аполлон-4 при сверхорбитальном входе в атмосферу // Известия РАН. МЖГ., 2017, № 6. С. 108 – 124.

5. **Surzhikov S.T.**, Radiation aerothermodynamics of the Stardust space vehicle/ J. Appl. Math. Mech., 2016. Vol. 80, No. 1. Pp. 44-56. <https://doi.org/10.1016/j.jappmathmech.2016.05.008>

6. **Егоров И.В., Никольский, В.С.**, Вязкие гиперзвуковые течения для различных аэрофизических моделей// Известия РАН. МЖГ., 1996. № 4. С. 151 – 161.

7. **Гурвич Л.В., Вейц И.В. и др.** Термодинамические свойства индивидуальных веществ: справочное издание в 4-х томах. М.: Наука, 1982.

8. **Park C., Howe J., Jaffe R.** Review of chemical-kinetic problems of future NASA mission, II: Mars entries // J. Thermophys. Heat Transfer, 1994, vol. 8. No. 1. Pp. 9 – 23. <https://doi.org/10.2514/3.496>

A.S. Grinenko¹

¹ Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Volokolamskoe highway, 4

ANALYSIS OF HEAT FLUXES FOR INTERPLANET MISSION REENTRY IN EARTH ATMOSPHERE

А.В. Бухаров, Е.В. Вишнеvский, А.Ф. Гиневский

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14 *

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЖИДКИХ СТРУЙ КСЕНОНА И КРИПТОНА В ВАКУУМ

Целью работы является разработка модели и проведение численных расчётов охлаждения тонких струй ксенона и криптона применительно к установкам по получению криогенных монодисперсных мишеней. Для реализации поставленной цели была создана модель истечения криогенной струи в область низкого давления и в программной среде PHOENICS численным методом исследовано изменение с течением времени температуры поверхности и внутренней части струи при различных внешних параметрах. Получена зависимость изменения температуры жидких струй ксенона и криптона вдоль поверхности струи и по радиусу от диаметра струи, скорости, начальной температуры и давления в рабочей камере. Показана принципиальная возможность создания высокоскоростных криогенных монодисперсных мишеней. В соответствии с расчётами, при вводе тонких жидких струй ксенона или криптона со скоростью большей 100 м/с в рабочую камеру с низким давлением, струи на расстоянии до 20 мм не успевают замёрзнуть и могут быть разбиты на монодисперсные капли. Капли за счёт испарения охлаждаются и становятся гранулами.

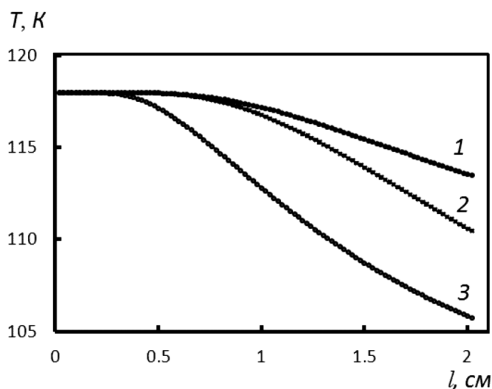


Рис. 1. График температуры на поверхности струи жидкого криптона по длине от входа в камеру, с различными скоростями на входе, при параметрах:
 $d = 20$ мкм, $P = 50$ мбар
1 — $v = 10$ м/с;
2 — $v = 50$ м/с;
3 — $v = 100$ м/с

*Е.В. Вишнеvский, emmanuelcell@mail.ru

Список литературы

1. Численное моделирование охлаждения струй водорода и дейтерия применительно к установкам по получению криогенных монодисперсных мишеней / А.В. Бухаров, Е.В. Вишнеvский, А.Ф. Гиневский // Вестник ДГТУ. Тех. науки. 2019; Т. 46. № 1. С. 8 – 17.
2. Injection of high-speed cryogenic liquid jets in a vacuum / A.V. Boukharov, A.F. Ginevsky, E.V. Vishnevsky // Journal of Physics: Conference Series. 11. Сер. «All-Russian Scientific Conference with International Participation «Thermophysics and Power Engineering in Academic Centers», TPEAC 2019" 2020. С. 012029.
3. Cooling of streams of hydrogen and deuterium in relation to units for receiving cryogenic monodisperse targets / A.V. Boukharov, A.F. Ginevsky, E.V. Vishnevsky // Journal of Physics: Conference Series. 2nd International Conference on Fusion Energy and Plasma Technologies, ICFEPT 2019. 2019. С. 012030.
4. Heat-Physical Problems of Cryogenic Corpuscular Targets / A.V. Boukharov, E.V. Ametistov, A.F. Ginevsky, M.A. Bukharova // Problems of atomic science and technology. Nuclear physics inv. – 2013. – № 6. – P. 205 – 208.
5. Production of Hydrogen, Nitrogen and Argon Pellet with the Moscow – Julich Pellet Target / A. Boukharov, M. Byscher, V. Balanutsa et al. // Int. J. of Modern Physics E, Nuclear Physics. 2009. V. 18. Is. 2. P. 505 – 510.

A V Boukharov, E V Vishnevsky, A F Ginevsky,

National Research University «MPEI»,
Russia, 111250 Moscow, Krasnokazarmennaya, 14

NUMERICAL SIMULATION OF LIQUID JETS OF XENON AND KRYPTON IN VACUUM

Н.Ю. Сидоренко^{1,2}, А.В. Ананьев², И.В. Латтев²

¹ Московский физико-технический институт
(Национальный исследовательский университет),
141701, Долгопрудный, институтский переулок, д. 9

² АО ГНЦ «Центр Келдыша»,
125438, г. Москва, ул. Онежская, д. 8

ИССЛЕДОВАНИЕ КАПИЛЛЯРНОЙ УДЕРЖИВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СЕТЧАТОГО МАТЕРИАЛА С МИКРОПОРАМИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Сетчатые материалы широко применяются в ракетно-космической техники в качестве фильтрующих элементов, газосепарирующих устройств и капиллярных заборных устройств. Последние широко используются как элементы топливозаборных устройств в баках космических аппаратов, длительное время находящихся в условиях невесомости, для гарантированного удерживания жидкого топлива на входе в систему питания двигателя.

Прогнозирование работы капиллярных заборных устройств как при невесомости, так и в условиях знакопеременных перегрузок является важной задачей подтверждения работоспособности баковых систем летательных аппаратов.

Для определения капиллярной удерживающей способности (КУС) топливозаборного устройства необходимо рассматривать взаимодействие среды со структурой сетчатого материала.

Настоящая работа посвящена математическому моделированию взаимодействия двухфазной среды с сеточной структурой под действием капиллярных сил методом решёточных уравнений Больцмана, а также расчётно-теоретическому определению КУС сетчатых элементов.

Капиллярная удерживающая способность – это разность давлений с обеих сторон сетчатой структуры, при которой материал утрачивает свою способность разделять газовую и жидкую фазы, то есть превышает максимальное значение капиллярного давления [3]:

$$\text{КУС} = \Delta p_{\text{сетки}} > p_{\sigma} = \frac{4\sigma_0}{d_n},$$

где σ_0 – коэффициент поверхностного натяжения; d_n – эквивалентный капиллярный диаметр; p_{σ} – капиллярное давление.

Таким образом, для выбранной пары «жидкость-газ» КУС можно сопоставить с некоторой геометрической характеристикой сетчатого материала, называемой эквивалентным капиллярным диаметром.

Для расчётного определения КУС сетчатого материала рассматривается задача динамического равновесия жидкой и газообразной фаз на ячейке

периодичности сетчатого материала [4, 5] (рис. 1).

Расчётная область в форме прямоугольного параллелепипеда, в середине которой располагается сетчатая структура, в начальный момент времени заполнена газом с одной стороны от сетки и жидкостью с другой (рис. 2).

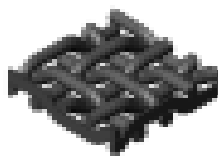


Рис. 1. Ячейка периодичности сетчатого материал

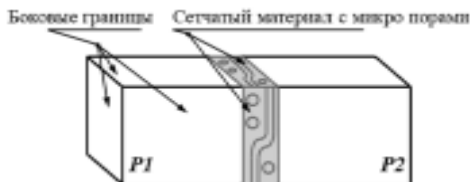


Рис. 2. Схема расчетной области

Давление в области заполненной газом задаётся большим, чем давление в области с жидкостью. Равновесие фаз обеспечивается за счёт баланса капиллярных сил и сил давления. При определённом перепаде давления, соответствующем КВС сетчатой структуры, сил поверхностного натяжения становится недостаточно для компенсации сил давления. Температурные изменения учитываются посредством изменения коэффициента поверхностного натяжения.

Список литературы

1. **Huang H. et al.** Multiphase Lattice Boltzmann Methods: Theory and Application // John Willey & Sons, Ltd, 2015. P. 390.
2. **Kupershtokh A.L., Medvedev D.A., Karpov D.I.** On equations of state in a lattice Boltzmann method // computers and Mathematics with Applications, 2009. V. 58. Pp. 965 – 974.
3. **Баргов В.В. и др.** Капиллярные системы отбора жидкости из баков космических летательных аппаратов. М.: УНПЦ «Энергомаш». 1997.
4. **Armour J.C.** Fluid Flow Through Woven Screens. 1968.
5. **Middelstadt F., Gerstmann J.** Numerical Investigations on Fluid Flow through Metal Screens, 2013.

N. Y. Sidorenko^{1,2}, I. V. Laptev^{1,2}, A. V. Ananyev¹

¹ Keldysh Research Centre, Moscow, Russia

² Moscow institute of physics and technology, Dolgoprudnyy, Moscow region, Russia

STUDY OF THE CAPILLARY HOLDING ABILITY OF A NETWORK MATERIAL WITH MICROPORES AT DIFFERENT TEMPERATURES

СЕКЦИЯ 5

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО-И МАССООБМЕНА

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ КАПЛИ ВОДЫ С НАГРЕТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

При разработке технологий обеспечения регламентных тепловых режимов работы элементов конструкций энергонасыщенного оборудования и разного рода специальных устройств необходимы модели и методы решения соответствующих задач теплопереноса, обеспечивающие возможность адекватного прогноза характеристик наиболее перспективного в настоящее время процесса капельного охлаждения нагретых до высоких температур поверхностей. Известные модели процесса испарения капель опираются на несколько (от двух до четырех) постоянных, которые определяются в специальных экспериментах, т.е. использующиеся в настоящее время модели не являются в полной мере автономными [1-3].

В настоящей работе представлены результаты математического моделирования процесса испарения капли воды с поверхности медной подложки с использованием новой модели, при применении которой нет необходимости проведения специальных экспериментов для замыкания системы уравнений и соответствующих краевых условий эмпирическими постоянными. Проведена верификация модели с использованием известных экспериментальных данных. Выполнен теоретический анализ температур в характерных точках капли воды и поверхности, на которой расположена капля в достаточно типичных для практики диапазонах тепловых нагрузок, условий отвода теплоты и паров воды в окружающую среду. Обоснована возможность использования разработанной модели при анализе условия охлаждения нагретых до высоких температур поверхностей в типичных для практики вариантах.

При разработке математической модели принято, что весь комплекс процессов тепло- и массопереноса, протекающих совместно в системе «подложка – капля жидкости – воздух», описывается системой уравнений в частных производных. При постановке задачи приняты три основных допущения: 1) В течение всего периода испарения форма капли изоморфна полусфере ($id(C)$); 2) Принята плоская (2D) постановка задачи; 3) Эффекты Марангони в капле не учитываются.

*С.В. Сыродой, ssyrodoy@yandex.ru

С учетом сделанных допущений математическая модель процессов тепломассопереноса в рассматриваемой системе «нагреваемая подложка – капля охлаждающей жидкости – слой смеси паров воды и воздуха» представляет собой систему уравнений математической физики. Распределение температуры в такой системе описывается уравнением энергии.

Получены типичные распределения температур в системе «капля жидкости – внешняя среда» (рис. 1) в период испарения капли через 0,2 секунды после начала процесса испарения (температура внешней среды $T_g = 293\text{K}$, начальная температура капли $T_0 = 293\text{K}$, температура подложки $T_s = 343\text{K}$, начальный радиус капли $r = 1,0\text{ мм}$).

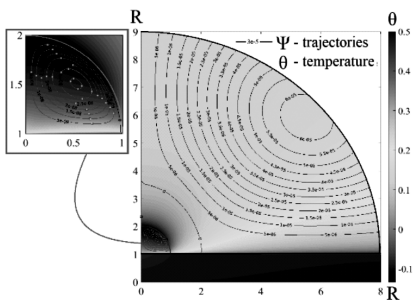


Рис. 1. Типичное температурное поле в системе «металлическая подложка – капля жидкости – внешняя среда» и линии тока (траекторий) во внешней среде и капле жидкости в момент времени $t = 5,0$ секунды после начала теплового воздействия

Список литературы

1. **Semenov S., Trybala A., Rubio R.G., Kovalchuk N., Starov V., Velarde M.G.** Simultaneous spreading and evaporation: Recent developments // *Adv. Colloid Interface Sci.* 2014. V. 206. P. 382 – 398.
2. **Zubkov V.S., Cossali G.E., Tonini S., Rybdylova O., Crua C., Heikal M., Sazhin S.S.** Mathematical modelling of heating and evaporation of a spheroidal droplet // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2017. V. 108. P. 2181 – 2190.
3. **Al-Sharafi A., Yilbas B.S., Ali H.** Droplet heat transfer on micro-post arrays: Effect of droplet size on droplet thermal characteristics // *Int. J. Heat Fluid Flow.* 2017. V. 68. P. 62 – 78.

Исследование поддержано РФФ №18-79-10015-P <https://rscf.ru/project/21-79-03032/>

S.V. Syrodoy¹, G.V. Kuznetsov¹, K.A. Voytkova¹

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
Russia 634050 Tomsk, Lenin Avenue, 30

**MATHEMATICAL MODELING OF THE EVAPORATION PROCESS
OF WATER DROPS FROM A HEATED SURFACE**

А.В. Дорожкин, Е.Г. Орлова, Д.В. Феоктистов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр-т Ленина, д. 30

ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТЯХ МАТЕРИАЛОВ, ТЕКСТУРИРОВАННЫХ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

В последнее время лазерные технологии все чаще используются для обработки материалов в связи со значительным удешевлением и распространением лазеров. Известно [1], что после лазерной обработки поверхность металлов характеризуется повышенной стойкостью к коррозии, биообрастанию, органическим загрязнениям в сравнении с необработанными поверхностями. Поверхности, модифицированные различными методами, в том числе и лазерным излучением, могут быть использованы для интенсификации фазовых переходов жидкостей (испарение, кипение, конденсация). Интенсификация процессов на модифицированных поверхностях лазерным излучением реализуется за счет формирования уникальной, развитой, многомодальной шероховатости (текстуры) и изменения элементного состава поверхностного слоя. В настоящей работе исследовано влияние характеристик текстуры металлов и керамических материалов, модифицированных лазерным излучением наносекундой длительности, на свойства смачивания и фазовые превращения капель широко используемых теплоносителей.

В качестве материалов использовался алюминиевый сплав АМГЗ и керамический материал (SiC). Текстура на предварительно полированных образцах формировалась с использованием лазерной системы на базе иттербиевого импульсного волоконного лазера IPG Photonics (длина волны 1064 нм).

Свойства смачивания и кризис теплообмена исследовались на установке, в которой реализована теневая оптическая методика [2]. Свойства смачивания определялись по теневым изображениям капли воды объемом 5 мкл. Кризис теплообмена регистрировался высокоскоростной видеокамерой при дозировании капли воды объемом 10 мкл на металл или керамику.

Измеренные статические контактные углы на полированных образцах АМГЗ и SiC составили 86,3 и 63,2 °, соответственно. Непосредственно после лазерного текстурирования, поверхности демонстрировали супергидрофильные свойства. Улучшение смачивания после обработки обусловлено образованием оксидной пленки. Со временем свойства смачивания ухудшались и поверхности становились супергидрофобными. Кризис теплообмена (эффект

Лейденфроста) исследовался на супергидрофильных образцах непосредственно сразу после лазерного текстурирования.

Кризис теплообмена определялся по величине статического контактного угла, образованного каплей и разогретой поверхностью, а также по наличию парового слоя между каплей и поверхностью (рис. 1).

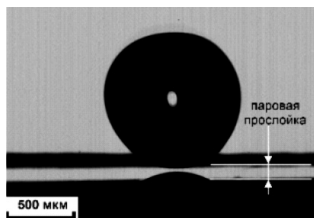


Рис. 1. Типичное теневое изображение капли воды в состоянии Лейденфроста

По результатам проведенных экспериментов установлено, что кризис теплообмена (эффект Лейденфроста) на полированных поверхностях АМГЗ и SiC возникает при температурах нагрева поверхностей 161 °С и 200 °С, соответственно. На текстурированных поверхностях температуры возникновения эффекта Лейденфроста составили 280 °С и 250 °С, соответственно на АМГЗ и SiC. В настоящей работе обоснована возможность сдвига кризиса теплообмена на 119 °С на сплаве АМГЗ и на 50 °С на SiC. Показано, что лазерная модификация поверхностей разных материалов (металлы, керамика) может быть использована для изменения их свойств смачивания. Лазерные технологии являются перспективными для обработки конструкционных материалов теплопередающих устройств.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ в рамках научного проекта № 21-73-10245.

Список литературы

1. **Emelyanenko A.M., Shagieva F.M., Domantovsky A.G., Boinovich L.B.** Nanosecond laser micro- and nanotexturing for the design of a superhydrophobic coating robust against long-term contact with water, cavitation, and abrasion // *Appl. Surf. Sci.* 2015. V. 332. P. 513 – 517.
2. **Kuznetsov G.V., Orlova E.G., Feoktistov D.V., Islamova A.G., Zhuikov A.V.** Droplet Spreading and Wettability of Abrasive Processed Aluminum Alloy Surfaces // *Met. Mater. Int.* 2020. V. 26. P. 46 – 55.

A.V. Dorozhkin, E.G. Orlova, D.V. Feoktistov

National Research Tomsk Polytechnic university,
Russia 634050 Tomsk, Lenin Ave. 30

PHASE TRANSITIONS ON MATERIAL SURFACES TEXTURED WITH LASER IRRADIATION

С.А. Князев¹, В.В. Яковлева¹, В.В. Сероштанов^{1,2}, В.Ю. Митяков^{1,2}

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

² Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
190121, г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3

ГРАДИЕНТНАЯ ТЕПЛОМЕТРИЯ В ИССЛЕДОВАНИИ ТЕПЛООБМЕНА ВНУТРИ ОВАЛЬНО-ТРАНШЕЙНОЙ ЛУНКИ

В задаче обтекания пластины широко распространены интенсификаторы в виде лунок, уступов и траншей различной формы. Сложность формы и широкий диапазон режимных параметров делают оценки трудоемкими, а их численное моделирование нуждается в верификации. В натурном эксперименте определить местную плотность теплового потока возможно с помощью градиентной теплотметрии, используемой, в данном случае, в исследовании теплообмена в овално-траншейной лунке (ОТЛ) [1].

Моделью служит ОТЛ глубиной $h/D = 0,156$, диаметром $D = 64$ мм и относительным удлинением цилиндрической части $S/D = 3$. ОТЛ выполнена из медного листа толщиной 0,2 мм и вварена в лист из стали толщиной 0,3 мм и размерами 380×190 мм. Пластина с ОТЛ смонтирована в короб, внутрь которого подается насыщенный водяной пар с температурой, близкой к 100 °С. Изотермичность поверхности модели проверялась с помощью инфракрасной камеры FLIR P640.

Исследования в аэродинамической трубе научно-образовательного центра «Теплофизика в энергетике» проводились для чисел Рейнольдса от 10^3 до $3 \cdot 10^4$. Плотность теплового потока измерялась при помощи градиентных датчиков теплового потока (ГДТП). Действие ГДТП основано на поперечном эффекте Зеебека: при прохождении теплового потока через пластину с анизотропией тепло- и электрофизических свойств в ней возникает термо-ЭДС, нормальная вектору теплового потока и пропорциональная модулю теплового потока [2]. В эксперименте использовались ГДТП из монокристалла висмута размерами 2,5×2,5×0,2 мм. Для регистрации сигналов использовался цифровой комплекс National Instruments NI 9213.

На рис. 1 показаны зависимости относительного коэффициента теплоотдачи (КТО) в продольном среднем сечении цилиндрической части ОТЛ. В качестве нормирующего значения, выбран КТО для сходственных точек на плоской поверхности.

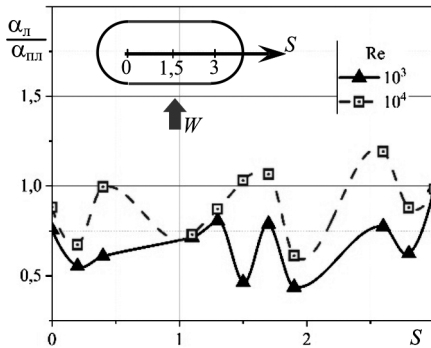


Рис. 1. Распределение относительного КТО в среднем сечении ОТЛ

Кривые несимметричны относительно поперечного сечения, что можно объяснить структурой потока: в сферической лунке образуются симметричные вихри, и кривые КТО симметричны относительно среднего сечения. При увеличении относительной глубины лунки до $0,3D$ и выше, или ее удлинении в лунке реализуется асимметричная смерчевая структура [1]. Результаты опытов показывают, что положение и уровень локальных экстремумов КТО зависят от режима течения: при турбулентном режиме течения максимальные относительный КТО превышает 1, а при ламинарном режиме составляет 75 % от сходственного значения на пластине.

Работа выполнена при поддержке РФФ (проект № 22-19-00056).

Список литературы

1. Исаев С.А., Никущенко Д.В., Попов И.А., Судаков А.Г., Тряскин Н.В., Юнаков Л.П. Интенсификация теплообмена в обдуваемом узком канале при трансформации отрывного турбулентного течения с ростом угла уклона уединенной конической лунки, ТВТ, 2022, том 60, выпуск 2, 235–241
2. Heat transfer and air flow near a pair of circular cylinders / V. Mityakov, V. Seroshtanov, A. Vlasov [et al.] // E3S Web of Conferences: EECE 2019, Saint-Petersburg, 19 – 20, Vol. 140. Saint-Petersburg: EDP Sciences, 2019. P. 06012

S.A. Knyazev¹, V.V. Yakovleva¹, V.V. Seroshtanov^{1,2}, V.Yu. Mityakov^{1,2}

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Russia, 195251, St. Petersburg, Politechnicheskaya, 29

² St. Petersburg State Marine Technical University,
Russia, 190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3

GRADIENT HEATMETRY IN THE STUDY OF HEAT TRANSFER INSIDE AN OVAL-TRENCH DIMPLE

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЛОЕ ЖИДКОСТИ НА МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

В данной работе представлены результаты исследования теплообмена при кипении в тонких горизонтальных слоях жидкости на 2-D модулированных капиллярно-пористых покрытиях. С помощью аддитивной SLS технологии [1] были изготовлены два покрытия из нержавеющей стали (образец 1) и из бронзы (образец 2) с расстоянием между ребрами 3,5 мм и одно покрытие из бронзы с расстоянием между ребрами 1,7 мм (образец 3). Длина волн модуляции покрытия выбиралась кратно капиллярной постоянной для исследуемой жидкости ($l_c = 1,7$ мм). Высота ребер $\delta = 550$ мкм. Пористость $\varepsilon = 44$ %.

Исследование было проведено на экспериментальном стенде, детальное описание которого приведено в статье [2]. Рабочая камера выполнена в виде цилиндрического сосуда из стали 12X18H10T с внутренним диаметром 120 мм и высотой 300 мм. Нагрев днища рабочей камеры осуществлялся электронагревателем с мощностью 2 кВт. Тепловой поток рассчитывался по уравнению Фурье из температурного градиента, измеренного с помощью термопар, расположенных в днище сбоку на различной высоте. В качестве рабочей жидкости использовался n-додекан. Исследование проведено в диапазоне изменения давления над слоем P_s (P_s Д.А. P_{cr}) = 0,033 – 20 кПа ($1,84 \cdot 10^5$ – $1,1 \cdot 10^2$), где P_s и P_{cr} – давление насыщения и критическое давление, соответственно.

Показано, что капиллярно-пористые покрытия при заданной плотности теплового потока уменьшают температурный напор почти в 3 раза по сравнению с гладкой поверхностью (рис. 1). Возможным механизмом интенсификации теплообмена является увеличение количества активных центров парообразования [3]. Для каждого из исследованных образцов покрытий имелись свои характерные особенности теплообмена. В частности, для образцов из бронзы наблюдалось более высокое значение температурного напора для начала кипения в отличие от образца из нержавеющей стали и гладкой поверхности.

*Д.А. Швецов, shvetsov.kh301@ya.ru

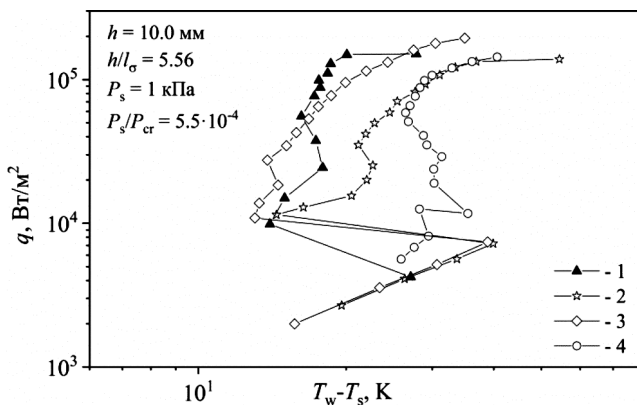


Рис. 1. Зависимость плотности теплового потока от температурного напора: 1 – образец 1; 2 – образец 2; 3 – образец 3; 4 – гладкая поверхность

Как видно из рис. 1, при плотности теплового потока $q = 10^5$ Вт/м² меньший температурный напор был получен на образце 1 из нержавеющей стали.

Список литературы

1. **Бессмельцев В.П., Павленко А.Н., Жуков В.И.** Разработка технологии создания структурированных капиллярно-пористых покрытий методом 3D-печати для интенсификации теплообмена при кипении // *Автометрия*. 2019. Т. 55. №. 6. С. 25 – 35.
2. **Zhukov V.I., Pavlenko A.N., Shvetsov D.A.** The effect of pressure on heat transfer at evaporation/boiling in horizontal liquid layers of various heights on a microstructured surface produced by 3D laser printing // *Intern. J. Heat Mass Transfer*. 2020. V. 163. P. 120488.
3. **Huang G., Tang K., Yu S., Tang Y., Zhang S.** Enhanced pool boiling heat transfer by metallic nanoporous surfaces under low pressure // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2022. V. 184. P. 122382

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН (№ 121031800216-1).

D.A. Shvetsov¹, A.N. Pavlenko¹, V.I. Zhukov^{1,2}

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics,
Russia, 630090, Novosibirsk, Acad. Lavrentiev ave., 1

² Novosibirsk State Technical University,
Russia, 630073, Novosibirsk, K. Marksa ave., 20

ENHANCEMENT OF HEAT TRANSFER DURING BOILING IN A HORIZONTAL LIQUID LAYER ON MODIFIED SURFACES

Д.В. Воробьев, А.С. Дмитриев

Национальный исследовательский институт «МЭИ»,
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ РЕЖИМОВ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ В СОСТАВЕ ЛАЗЕРНОГО МОДУЛЯ

Вопрос активной термостабилизации и охлаждения устройств микро – и оптоэлектроники является актуальным, так как температура устройств влияет на ключевые характеристики оптоэлектронных устройств (светодиоды, полупроводниковые лазеры и т.д.). Технологии охлаждения, включая воздушное охлаждение, жидкостное охлаждение, охлаждение с помощью тепловых трубок, микроканальное охлаждение и охлаждение на базе материалов с фазовым переходом, на сегодняшний день является основным способом поддержания температуры поверхности электронных устройств ниже допустимой рабочей температуры (~ 70 °С). С появлением устройств с высокими тепловыми потоками обычные системы термоменеджмента уже не подходит для эффективного отвода тепла с достаточно высокой скоростью [3]. В связи со сказанным, продолжаются поиски новых и усовершенствование уже имеющихся систем термостабилизации.

Постоянный рост мощности лазерных диодов, одновременно с уменьшением их размеров, и постоянное ужесточение требований к энергопотреблению, приводит к более тщательной проработке системы термостабилизации [1-3]. В данной работе рассматривается термоэлектрический модуль в качестве ключевого компонента термостабилизации в лазерном модуле, для которого важны такие параметры, как длина волны лазерного диода, темновой ток фотодетектора и другие характеристики. Исследуются энергетические характеристики термоэлектрического модуля в режиме термостабилизации источника тепла при 25 °С при изменении теплоотводящей стороны термоэлектрического модуля от 0 до 70 °С.

В данной работе представлены исследования в области теплофизики функционирования оптоэлектронных устройств с термоэлектрическим модулем в качестве системы термостабилизации. Представлены схема лазерного модуля и схема установки для тестирования термоэлектрических модулей. В работе представлены результаты исследования рабочих режимов работы термоэлектрического модуля в режиме термостабилизации объекта при изменении внешних температур от 0 до 70 °С. График зависимости потребляемой

мощности термоэлектрическим модулем в зависимости от изменения внешней температуры окружающей среды представлен на (рис. 1). Согласно полученным данным, потребляемая мощность термоэлектрического модуля при различных тепловых нагрузках, немонотонно возрастает с ростом температуры.

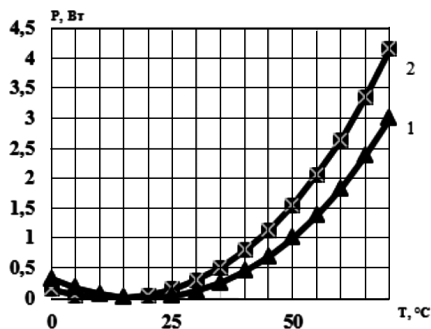


Рис. 1. Потребляемая мощность термоэлектрического модуля при различных тепловых нагрузках:
1 – $Q_c = 1$ Вт; 2 – $Q_c = 2$ Вт

В работе также предложены варианты оптимизации конструкции термоэлектрического модуля с целью снижения его энергопотребления в составе лазерного модуля.

Список литературы

1. **Дмитриев А.С.** Введение в нанотеплофизику. М.: БИНОМ, 2015. 756 с.
2. **Shi X., Zou J., Chen Z.** Advanced thermoelectric design: from materials and structures to devices, Chem. Rev. 120 (2020) 7399–7515.
3. **Cai Y., Wang Y., Liu D., Zhao F.-Y.** Thermoelectric cooling technology applied in the field of electronic devices: updated review on the parametric investigations and model developments, Appl. Therm. Eng. 148 (2019). P. 238 – 255

D.V. Vorobyev, A.S. Dmitriev

Moscow Power Engineering Institute

Russia 111250 Moscow, Krasnokazarmennaya Str., 14, build. 1

INVESTIGATION OF THE OPERATING MODES OF THERMOELECTRIC STABILIZATION AS A PART OF A LASER MODULE

А.П. Железнов, А.В. Птахин, В.С. Крылов
Россия, г. Калуга, ЗАО «НПВП «Турбокон»

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КИПЕНИЯ И КОНДЕНСАЦИИ ХЛАДАГЕНТА

Свойства хладагентов хорошо изучены в области низких температур, так как основная их область применения в холодильной технике и криогенике. В связи с этим, в настоящее время практически отсутствуют работы, посвященные исследованию процессов кипения хладагентов, дающие обобщенную формулу для определения коэффициента теплоотдачи при кипении и конденсации хладагентов, что в свою очередь затрудняет проектирование теплообменного оборудования для перспективных теплоутилизирующих энергокомплексов [1].

Представленная работа посвящена экспериментальному исследованию хладагента – фреона марки R113, по определению теплофизических характеристик для процесса его кипения и конденсации [2].

Работа проведена коллективом МНИЛ им. В.А. Федорова при ЗАО НПВП «Турбокон» на специально разработанном стенде (рис. 1) по исследованию процессов теплообмена для фреона, который выступает в качестве теплоносителя. Экспериментальный стенд выполнен в соответствии с грантом №22-19-00495 «Исследование методов интенсификации теплообмена при конденсации перспективных рабочих тел органического цикла Ренкина в наклонных и горизонтальных трубах»

Рабочим телом в стенде является фреон марки R-113, а в качестве греющей среды используется вода высокого давления (ВВД). Работа стенда организована как часть органического цикла Ренкина (ОЦР) [3]. Фреон поступает в ПГ в жидкой фазе нагревается и испаряется за счет тепла, отданного со стороны ВВД. На выходе из ПГ фреон поступает в конденсатор и снова поступает в ПГ. В конденсаторе происходит изменение фазового состояния фреона за счет подачи охлаждающей воды. Перед входом в ПГ установлен вспомогательный электронагреватель, предназначенный для дополнительного нагрева фреона на входе.

В данной работе представлена серия испытаний, проводимых на экспериментальном стенде на различных режимах работы ПГ и конденсатора. Цель экспериментов – это получения характеристики распределения коэффициентов теплоотдачи от греющей среды (ВВД) к поверхности теплообмена ПГ на различных режимах. А также зависимость среднего значения коэффициента теплоотдачи α от средней величины теплового потока $q_{ср}$ в конденсаторе.

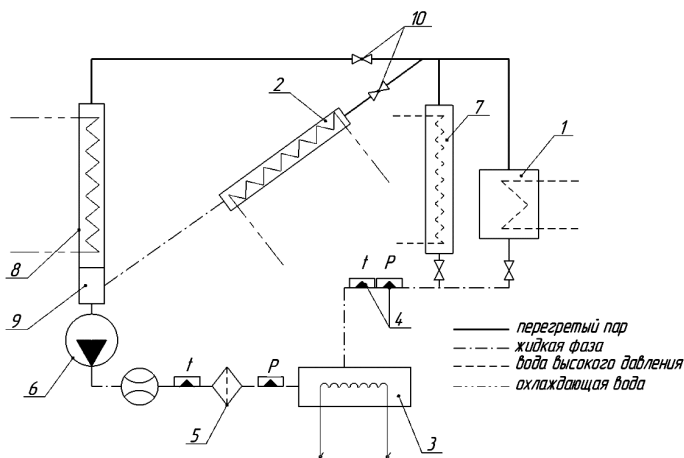


Рис. 1. Общий вид экспериментального стенда:
 1 – парогенератор (ПГ); 2 – конденсатор; 3 – циркуляционный насос;
 4 – расходомерное устройство; 5 – фильтр грубой очистки рабочего тела;
 6 – дополнительный электронагреватель на входе в ПГ; 7 – КИП;
 8 – вспомогательный конденсатор; 9 – конденсаторосборник;
 10 – запорная арматура

В результате проведения испытаний получены измерения основных термодинамических параметров работы при переменном расходе охлаждающей воды на конденсатор.

Список литературы

1. **Сергиенко Р.В.** Пути повышения эффективности рабочего цикла энергетических утилизирующих установок с низкокипящими рабочими телами / Р.В. Сергиенко, Б.Д. Билека, В.Я. Кабков // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2012. Вып. 8(95). С. 38 – 422.
2. **Алтуний В.В., Геллер В.З., Кременевская Е.А., Перельштейн И.И., Петров Е.К.** Теплофизические свойства фреонов. М.: Изд-во стандартов, 1980.
3. **Любомир Янчошек, Петер Кунц.** Органический цикл Ренкина: использование в когенерации // *Турбины и дизели* /март-апрель 2012. С. 50 – 53.

A.P. Zheleznov, A.V. Ptakhin, V.C.Krylov
 ZAO NPVP Turbocon, Kaluga, 248010 Russia

INVESTIGATION OF THE PROCESSES OF BOILING AND CONDENSATION OF REFRIGERANT

*Е.С. Данильчик^{1,2}, А.Б. Сухоцкий², Ю.В. Жукова¹, Г.С. Маршалова^{1,2},
А.Д. Чорный¹, Т.А. Баранова¹, Р.Г. Кадъров³, А.А. Миронов³, И.А. Попов³*

¹Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси,
220072, г. Минск, ул. П. Бровки, д. 15*

²Белорусский государственный технологический университет,
220006, г. Минск, ул. Свердлова, д. 13а

³Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ,
420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОТЫ РЕБРА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛООТДАЧИ ОДНОРЯДНОГО ПУЧКА В РЕЖИМЕ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ, ИНТЕНСИФИЦИРОВАННОЙ С ПОМОЩЬЮ ВЫТЯЖНОЙ ШАХТЫ

В настоящее время одним из действенных направлений по реализации энергосберегающих технологий при использовании теплообменных аппаратов воздушного охлаждения является применение в оборудовании свободной конвекции с уменьшением или исключением процессов при вынужденной конвекции. Это позволяет упростить техническую систему, снизить уровень шума и расхода электроэнергии, а за счет увеличения поверхности теплообмена и интенсификации воздуха возможна минимизация действия низкого коэффициента теплопередачи. Кроме того, использование компактных ребристые теплообменников позволяет экономить пространство на предприятиях [1].

В статье приведены результаты исследования влияния высоты ребра труб на интенсивность теплоотдачи горизонтального однорядного пучка в режиме свободной конвекции, интенсифицированной вытяжной шахтой [1, 2].

Исследования выполнены для биметаллических оребренных труб со спиральными накатными ребрами с коэффициентом оребрения $\phi = 19,3$ (I тип, $h/s = 5,84$). Материал ребристой оболочки – алюминевый сплав АД1М, материал несущей трубы диаметром $d_{\text{н}} = 25$ мм и толщиной стенки $\delta = 2$ мм – углеродистая сталь. Геометрические параметры труб следующие: наружный диаметр оребрения $d = 56,0$ мм; диаметр трубы по основанию $d_0 = 26,8$ мм; высота ребра $h = 14,6$ мм; шаг ребра $s = 2,5$ мм; средняя толщина ребра $\Delta = 0,5$ мм. Для изменения высоты ребер труб пучка они стачивались путем шлифования с образованием новых типов II – VI (II тип – $h/s = 4,80$; III тип – $h/s = 3,20$; IV тип – $h/s = 1,64$; V тип – $h/s = 0,80$; VI тип – гладкая труба, $h/s \approx 0$). Компоновка однорядных пучков проводилась с постоянным относительным поперечным шагом $\sigma_1 = S_1/d = 1,14$ из $n = 6$ труб [1, 2].

* Е.С. Данильчик, katya.156.156@gmail.com

Для оценки влияния относительной высоты ребра труб h/s на интенсивность теплоотдачи однорядного пучка (типы I – VI) с установленной над ним вытяжной шахтой разной геометрии [1, 2] при постоянном числе Рейля $Ra = 100\,000$, были построены зависимости $Nu = f(h/s)$, $Nu = f(Nu_\phi)$. При анализе зависимости $Nu = f(h/s)$ получено, что при уменьшении высоты ребра труб однорядного пучка (типы I – VI) интенсивность теплоотдачи, отнесенной к полной оребренной поверхности труб, возрастает и наибольшей теплоотдачей обладает гладкий однорядный пучок (тип VI).

Для оценки тепловой эффективности однорядных пучков с различной высотой ребра труб, которая определяется теплоотдачей и площадью теплообменной поверхности была построена зависимость $Nu_\phi = f(h/s)$. Определено, что наибольшая теплоотдача однорядного пучка, отнесенная к площади поверхности труб по основанию ребер, характерна для пучка I типа (с наибольшей относительной высотой ребра, $h/s = 5,84$, $\phi = 19,3$).

Список литературы

1. Convective heat exchange of single-row bundles from tubes with rolled aluminum fins of various height at a low values of the Reynolds number / A.B. Sukhotski, E.S. Danilchik // Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc. 2021. Vol. 64, № 4. P. 336 – 348.

2. Influence of an exhaust shaft airflow section on single-row bundle air cooling comprising tubes with spiral fins of different heights / E.S. Danilchik, A.B. Sukhotski, T.B. Karlovich // Chemical and Petroleum Engineering. 2022. Vol. 58, № 3 – 4. P. 315 – 322.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант T21PM-019) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 20-58-04002).

E.S. Danilchik^{1,2}, A.B. Sukhotski², Yu.V. Zhukova¹, G.S. Marshalova^{1,2}, A.D. Chorny¹, T.A. Baranova¹, P.T. Kadyrov³, A.A. Mironov³, I.A. Popov³

¹Institute of Heat and Mass Transfer named after A.V. Lykov NAS of Belarus, Republic of Belarus, 220072, Minsk, P. Brovki, 15

²Belarussian State Technological University, Republic of Belarus, 220006, Minsk, Sverdlova, 13a

³Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev (KAI), Russia, 420000, Kazan, K. Marx, 10

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF RIB HEIGHT ON THE HEAT TRANSFER INTENSITY OF A SINGLE-ROW BUNDLE UNDER FREE CONVECTION INTENSIFIED BY EXHAUST SHAFT

М.Н. Сергеев, А.М. Сергеев

Рыбинский государственный авиационный технический университет,
152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, д. 53*

СИСТЕМА СИЛЬНО ЗАКРУЧЕННЫХ СТРУЙ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТРУБЕ

Для интенсификации теплообмена внутри труб можно использовать разные методы [1]. В частности, поток газа, поступающий в трубу можно закрутить. Можно также разбить его на систему отдельных струй. Основная задача всех этих мероприятий состоит в том, чтобы изменить внутреннюю структуру потока, улучшить условия теплообмена между поверхностью канала и газом или жидкостью, которые движутся в нем.

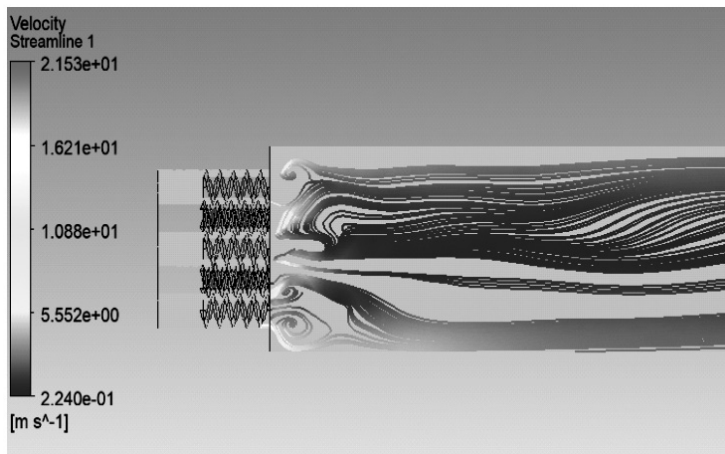


Рис. 1. Линии тока в продольном сечении трубы

Расчеты линий тока в поперечном сечении (рис. 1) показали, что периферийные закрученные струи быстро преобразуются в осесимметричную центральную струю.

* М.Н. Сергеев, mihail_sergeev@mail.ru

Список литературы

1. **Рзаев А.И.** Влияние геометрии интенсификатора спиральных канавок на конвективную теплоотдачу в трубах / А.И. Рзаев, Л.Л. Филатов, Г.В. Цилкаури и др. // Теплоэнергетика. 1992. № 2. С. 53 – 55.

M.N. Sergeev, A.M. Sergeev

Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University,
Russia 152934 Rybinsk, Pushkina, 53

A SYSTEM OF HIGHLY SWIRLED JETS IN A CYLINDRICAL TUBE

Д.А. Коновалов^{1,2}, В.И. Ряжских², Н.Н. Кожухов², А.А. Завгородний²

¹ ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 17

² ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»,
394020, г. Воронеж, 20-летия Октября, д. 84*

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В КАНАЛАХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК С РАЗВИТЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

Развитие современных энергетических установок различного предметного назначения требует необходимости отвода высоких удельных тепловых потоков с одновременным снижением массогабаритных характеристик. Так, для современных радиоэлектронных устройств требуется отводить тепловые потоки до 400 Вт/см^2 [1]. Поэтому в основу технических решений для создания компактных теплообменников, закладывается применение различных способов интенсификации теплообмена.

В настоящей работе были рассмотрены такие способы интенсификации теплообмена при вынужденном однофазном течении теплоносителя в трубах круглого сечения как изменение микрорельефа поверхности (искусственная шероховатость, поперечные кольцевые гофры), искусственная турбулизация потока (спирально-навитые трубы), пористые и микроканальные вставки. Расчетная область представлена на рис. 1.

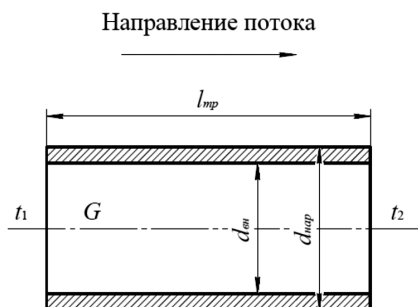


Рис.1. Расчетная модель

*Д.А. Коновалов, dmikonovalov@yandex.ru

Принимаем следующие допущения: теплоносителем в рабочем пространстве является жидкость – вода; вода является несжимаемой средой; в канале стационарный режим течения теплоносителя; теплофизические свойства теплоносителя определяются по его средней температуре в канале; физические величины, относящиеся к температуре стенки, определяются по средней температуре стенки.

Для оценки эффективности использования интенсификации теплоотдачи в теплообменном аппарате использовалась известная расчетная зависимость [2]

$$\eta = \left(\frac{Nu}{Nu_{г\text{л}}} \right) / \left(\frac{\xi}{\xi_{г\text{л}}} \right),$$

где $Nu_{г\text{л}}$ и Nu – значения критериев Нуссельта соответственно для гладкой трубы и для трубы с интенсификатором; $\xi_{г\text{л}}$ и ξ – коэффициент гидравлического сопротивления для гладкой трубы и для трубы с интенсификатором.

В ходе исследования было установлено, что при определенных рабочих параметрах и геометрии канала в условиях вынужденного однофазного течения теплоносителя наибольшую эффективность теплообмена показала конфигурация трубы с поперечными кольцевыми гофрами (более чем в 2 раза), а также использование микроканальных и пористых вставок (в 1,6 раза). При этом использование спирально-навитых труб практически не дает эффекта.

Список литературы

1. **Konovalev D.A., Ryazhskikh V.I., Lazarenko I.N. and Kozhukhov N.N.** Model of Cooling of Compact Surfaces by Microchannel Recuperative Heat Exchangers with a Matrix of Filamentary Silicon Single Crystals // Journal of Engineering Physics and Thermophysics, March 2019, Volume 92, 2, pp. 371–380.

2. **Дзюбенко Б.В., Кузма-Кичта Ю.А., Леонтьев А.И., Федик И.И., Холпанов Л.П.** Интенсификация тепло- и массообмена на макро-, микро- и наномасштабах / Б.В. Дзюбенко // Монография. М.: ФГУП «ЦНИИАТОМИНФОРМ». 2008. 532 с.

D.A. Konovalev^{1,2}, *V.I. Ryazhskikh*², *N.N. Kozhukhov*², *A.A. Zavgorodniy*

¹ National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,
Russia 111250 Moscow, Krasnokazarmennaya, 17

² Voronezh State Technical University,
Russia, 394020, Voronezh, 20-let Oktyabrya, 84

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF HEAT EXCHANGE INTENSIFICATION IN THE CHANNELS OF POWER PLANTS WITH DEVELOPED SURFACES

А.В. Золотухин, В.И. Терехов

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, д. 1*

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ АЭРОДИНАМИКИ ПРИ ОБТЕКАНИИ СОТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В работах [1-3] представлены результаты экспериментального исследования влияния сотовых ячеек на протекающий поток газа. Одним из эффектов их взаимодействия является проскальзывание потока. Данный эффект характерен снижением трения и теплообмена по причине формирования в ячейках периодической вихревой структуры, которая позволяет уменьшить взаимодействие между потоком воздуха и сотовой поверхностью. Снижение трения и общее снижение взаимодействия между поверхностью и средой является на данный момент актуальной задачей в большом спектре энергетических технологий.

Данная работа является продолжением [4] и посвящена опытному исследованию развития поля течения и турбулентных характеристик вдоль сотовых поверхностей с ячейками гексагональной формы с поперечным размером d равному 12 мм, глубиной b равной 2,4, 6, 12 и 24 мм и толщиной стенок 0,5 мм, Рабочий канал экспериментального стенда имел прямоугольное сечение размером 20×150 мм², длину 1 м и был выполнен из прозрачного органического стекла толщиной 8 мм. На расстоянии 580 мм от входа в канал заподлицо монтировались сотовые пластины размером 58×182 мм². Измерения проводились с помощью двух оптических методов: PIV-системы, состоящей из твердотельного импульсного Nd:YAG лазера с длительностью вспышки 5 нс и цифровой камеры с матрицей 1 Мпикс, и метода LDA, состоящего из блока излучателя ЛАД-06С и координатно-позиционирующего устройства. В опытах изучалось развитие течения по всей длине сотовых пластин в нескольких сечениях при постоянных числах Рейнольдса: $Re = U h / \nu = 7 \cdot 10^3 - 4.6 \cdot 10^4$, где h – высота канала. Однако LDA, являясь точечным бесконтактным методом, позволял измерять динамические параметры потока внутри отдельных ячеек каждого из четырех сотовых участков, что способствовало изучению интенсивности и размеров вихревых структур в гексаго-

*А.В. Золотухин, zoloav.hm@gmail.com

нальных ячейках. Пример профилей скорости в центре ячеек различной глубины представлены на рис. 1.

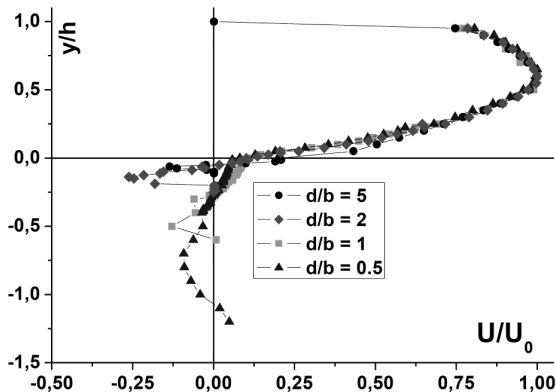


Рис. 1. Распределение скорости в канале с различной глубиной сот

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (мегагрант № 075-15-2021-575).

Список литературы

1. **Trdatyan S.A., Klimov A.A.** Friction and heat transfer on a honeycomb surface in laminar and turbulent flows // Proc. of the 12th Intern. Heat Transfer Conf. (2002, Grenoble, France). Grenoble, 2002. Vol. 2. P. 609 – 614.
2. **Климов А.А., Трдастьян С.А.** Использование сотовой поверхности для управления пограничным слоем при обтекании сотовой поверхности // Теплофизика Высоких Температур. 2003. Т. 41 (6). С. 901 – 906.
3. **Butt U., Jehring L., Egbers C.** Mechanism of drag reduction for circular cylinders with patterned surface // Int. J. of Heat and Fluid Flow. Vol. 45 (1). P. 128 – 134. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2013.10.008.
4. **Терехов В.И., Смутьский Я.И., Шаров К.А., Золотухин А.В.** Структура пограничного слоя при обтекании сотовой поверхности в плоском канале // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21 (6). С. 719 – 724.

A. V. Zolotukhin, V. I. Terekhov

Institute of Thermophysics SS Kutateladze SB RAS,
630090, Novosibirsk, Academician Lavrentyev Avenue, 1

EXPERIMENTAL INVESTIGATION RESULTS OF AERODYNAMICS IN THE FLOW AROUND HONEYCOMB SURFACES

И.А. Максимов¹, Е.Н. Сабанова¹, В.О. Киндра¹

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14*

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИНТЕНСИФИКАТОРА НА ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАСТИНЧАТО-ТРУБЧАТОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

В системах, где теплообмен протекает между жидкостью и газом, либо где отношение объёмных расходов достаточно высоко, широкое применение получило пластинчатое оребрение теплообменных труб, которое позволяет существенно увеличить компактность теплообменного оборудования. Вызвана необходимость оребрения, в первую очередь, низким уровнем теплоотдачи от газовых потоков, что приводит к потребности увеличения площади теплообмена. Это напрямую сказывается на массе, металлоёмкости и, как следствие, стоимости теплообменных систем. Интенсификация теплообмена может привести к повышению удельного теплосъёма в пластинчато-трубчатых аппаратах, в связи с чем вопрос разработки конструкторских решений для них является актуальным.

Изменение конфигурации поверхностей теплообмена за счёт добавления впадин сферической, овальной и других форм является одним из перспективных способов вихревой интенсификации [1]. Так, например, облунение поверхностей получило широкое применение в системах охлаждения высокотемпературных лопаток газовых турбин. Другим перспективным направлением их применения является теплообменное оборудование, однако нерешённым на сегодняшний день остаётся вопрос определения оптимальных с теплогидравлической точки зрения геометрических параметров интенсификаторов.

В настоящей работе было проведено численное исследование влияния относительной глубины сферических лунок $H_{\text{лун}}$, выдавленных в пластине соосно с трубами шахматного пучка пластинчато-трубчатого теплообменного аппарата на его теплогидравлические характеристики (рис. 1). Моделирование течения в канале проводилось в программной среде Ansys CFX с использованием RANS подхода и SST модели турбулентности. В качестве объекта рассматривалось межпластинное пространство теплообменника, в котором поперечно обтекается шахматный пучок труб потоком углекислого газа. Диаметр труб $D = 1$ см, продольный и поперечный шаг $S_1 = 5D$ $S_2 = 2,5D$, межпластинное расстояние $B = 2D$. Исследование проводилось при фиксированном диаметре лунки $D_{\text{лун}} = 3,5D$.

*И.А. Максимов, MaksimovIA98@gmail.com

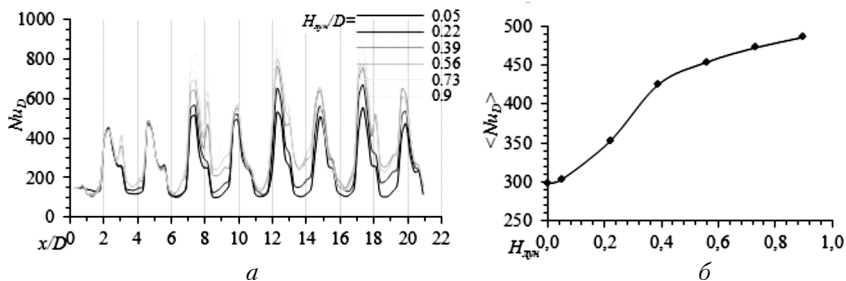


Рис. 1. Тепловые характеристики канала при числе Рейнольдса $Re_D=25000$ в зависимости от глубины интенсификатора:
 а – распределение локального числа Нуссельта по длине канала;
 б – среднеинтегральное значение

Было выявлено, что увеличение глубины сферических углублений в пластине, образованных соосно с трубами, приводит к увеличению теплоотдачи в канале пластинчато-трубчатого теплообменного аппарата. При этом при значениях $H_{луч} > 0,39D$ наблюдается замедление роста осредненного числа Нуссельта, которое объясняется ухудшением теплосъема от рядов труб, где вместо впадин находятся сферические выступы, образующиеся от интенсификаторов в соседних каналах, а также ухудшением теплопереноса в самих впадинах. Одновременно с этим увеличивается гидравлическое сопротивление каналов: при увеличении $H_{луч}$ с $0,39D$ до $0,9D$ коэффициент гидравлического сопротивления увеличивается более чем в 2,5 раза.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания № FSWF-2023-0014 (Соглашение № 075-03-2023-383 от 18 января 2023 г.) в сфере научной деятельности на 2023-2025 гг.

Список литературы

1. Численное и экспериментальное исследование вихревой интенсификации теплообмена на структурированных наклонными канавками поверхностях / С.А. Исаев, А.Г. Судаков, С.В. Гувернюк [и др.] // Материалы Восьмой Российской национальной конференции по теплообмену. 2022. С. 122 – 125.

I.A. Maksimov¹, E.N. Sabanova¹, V.O. Kindra¹

¹ National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,
 Moscow, 111250, Krasnokazarmennaya, 14

NUMERICAL ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE GEOMETRIC PARAMETERS OF THE INTENSIFIER ON THE THERMOHYDRAULIC CHARACTERISTICS OF A PLATE-TUBE HEAT EXCHANGER

И.И. Хабибуллин

АО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа»
420029, г. Казань, ул. Сибирский тракт, д. 40

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА В АППАРАТАХ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

На сегодняшний день наилучшим способом уменьшения габаритов, стоимости и повышения энергоэффективности теплообменных аппаратов (далее-ТА) является применение интенсификаторов теплообмена. Интенсификаторы теплообмена снижают термическое сопротивление пристенного пограничного слоя при конвективном теплообмене в ТА, способствуя повышению коэффициента теплоотдачи с увеличением площади поверхности. К интенсификаторам теплообмена относятся ребра, ленточные завихрители потока, спиральные выступы, канавки, спиральные проволочные вставки, засыпка полых металлических шариков, выступы и выемки различной конфигурации. Отметим, что разработчики ТА при использовании интенсификаторов теплообмена, кроме выполнения технического задания Заказчика, преследуют цели энергосбережения, достигающие за счет увеличения тепловой мощности существующего ТА без изменения потерь давления при фиксированном расходе теплоносителей, снижения температурного напора между теплоносителями для обеспечения заданной тепловой мощности при фиксированных габаритах теплообменника, снижения мощности на прокачку теплоносителя при фиксированной тепловой мощности и сохранении площади поверхности теплообмена, уменьшения массогабаритных характеристик теплообменника при сохранении его тепловой мощности и уровня потерь давления в его трактах.

В данной работе рассмотрено проектирование аппарата воздушного охлаждения масла модульной конструкции применительно к компрессорным установкам газовой отрасли РФ с применением в качестве интенсификатора теплообмена –оробрение выполненной с помощью технологии деформации резания алюминиевой трубы прямоугольного сечения. В работе представлены основные этапы исследования интенсификатора теплообмена и внедрение в производство готового изделия аппарата воздушного охлаждения, включая теоретического исследования (анализ литературы, патентный обзор, анализ эксплуатации), экспериментальное исследование отдельных элементов конструкции (теплогидравлические испытания отдельных оробренных труб с

получением безразмерных характеристик), проектирования (проектный теплогидравлический расчет, 3D моделирование, численное исследование 3D модели на тепловые аэродинамические характеристики, выпуск конструкторской документации), сборки на производстве изделия и проведения функциональных, ресурсных испытания.

По результатам проектирования выбрана наиболее оптимальная конструкция интенсификатора теплообмена и схема течения теплоносителя в аппарате воздушного охлаждения масла с оптимальным соотношением тепловой эффективности и потерь давления в тракте теплоносителя. Принято решение о разработке конструкторской документации на типоразмерный ряд по итогам испытаний рабочего прототипа.

I.I. Khabibullin

JSC NIIturbokompressor
Kazan, 420029, st. Siberian tract, 40

INTENSIFICATION OF HEAT-MASS TRANSFER IN AIR COOLERS

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

¹ Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1

² Новосибирский государственный университет,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, д. 1

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ С НАГРЕТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЧИСЛАХ ВЕБЕРА

Работа посвящена изучению динамики капли жидкости, падающей на нагретую поверхность. В качестве рабочей жидкости использовались вода и диэлектрическая жидкость HFE 7100. В основных экспериментах температура подложка была выше температуры кипения жидкости: для очищенной дегазированной деионизированной воды Milli-Q 100 – 170 °С, для HFE-7100 температура варьировалась от 50 до 130 °С. Подложкой служила сапфировая пластина с прозрачным нагревателем из оксида индия-олова, что позволяло визуализировать сверху образующиеся пузырьки в капле жидкости. Капли жидкости формировались с помощью шприцевого насоса и наконечника диаметром 0,35 мм. Числа Вебера для воды варьировались $We = 38 - 97$, а для HFE-7100 $We = 164 - 493$. Визуализация проводилась с помощью высокоскоростной камеры Phantom VEO 410L и стереомикроскопа Альтами (рис. 1).

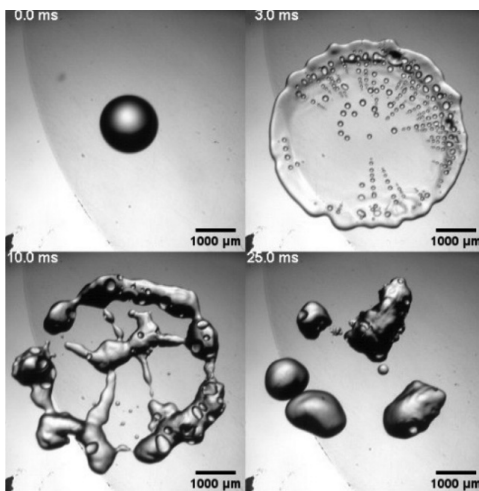


Рис. 1. Режим атомизации (atomization):

$T_w = 80^\circ \text{C}$;

$We = 118$;

HFE 7100

Подробное описание установки можно найти в предыдущих работах [1, 2]. Производилась покадровая обработка записанных данных. Были получены карты режимов соударения в зависимости от числа Вебера и исходной температуры подложки для воды и для HFE-7100 (рис. 2), гистограммы пузырей пара, возникающие в тонкой пленке жидкости для различных чисел Вебера, зависимости контактных диаметров растекания капель от чисел Вебера, были исследованы времена разрыва тонкой пленки жидкости в зависимости от температуры подложки. Выделены новые режимы для легкокипящей жидкости HFE 7100.

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

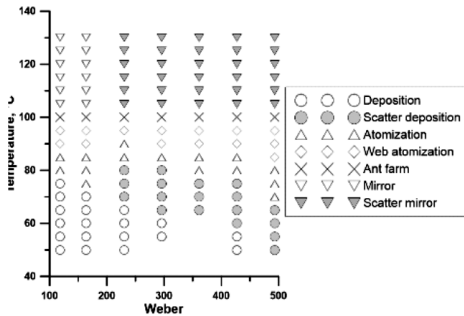


Рис. 2. Карта режимов соударения капли в зависимости от температуры и числа Вебера для жидкости HFE 7100

Список литературы

1. Gatapova E.Ya., Gatapova K.B. Bubble dynamics in thin liquid film and breakup at drop impact, *Soft Matter*, 16, 10397 – 10404 (2020).
2. Gatapova E.Y., Sitnikov V.O., Sharaborin D.K. Visualization of drop and bubble dynamics on a heated sapphire plate by high-speed camera enhanced by stereomicroscope. *Journal of Flow Visualization and Image Processing*, 29 (2), 87-103 (2022).

V.O. Sitnikov^{1,2}, E.Ya. Gatapova^{1,2}

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Russia, 630090 Novosibirsk, prospekt Akademika Lavrent'yeva, 1

² Novosibirsk State University,
Russia, 630090 Novosibirsk, Pirogova, 1

INTERACTION OF LIQUID DROPLETS WITH A HEATED SURFACE AT DIFFERENT WEBER NUMBERS

И.М. Черника, М.К. Болога

Институт прикладной физики

Молдова, г. Кишинев, МД – 2028, ул. Академическая, д. 5*

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ НА МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Введение. Несмотря на отвод больших тепловых потоков при кипении жидкостей на технически гладких поверхностях, развитие современных технологий требует обеспечения существенной возможности увеличения коэффициентов теплоотдачи. Одним из современных научно обоснованных и экспериментально проверенных методов является интенсификация теплообмена при кипении в поле электрических сил на модифицированных поверхностях [1], с помощью которого можно добиться существенного улучшения технических показателей теплообменных аппаратов.

Методическое обеспечение эксперимента. Кипение осуществлялось на нержавеющей горизонтальной трубке внешним диаметром 4 мм и длиной 80 мм, покрытой электроискровым способом тонким слоем нержавеющей стали с развитой шероховатостью $Ra = 4,285$ мкм. Теплоотдающий элемент погружался в сравнительно большой объем жидкости – гексан с температурой кипения $68,7$ °С. Высоковольтный электрод в виде латунной круглой решетки диаметром 60 мм с поперечными насечками, обращенными к поверхности нагрева, располагался параллельно ей сверху. Межэлектродное расстояние δ составляло 2, 3, 4, 6 и 8 мм. Использовалась электрическая схема с отрицательным высоковольтным потенциалом, который изменялся ступенчато до 15 кВ. Эксперименты проводились при атмосферном давлении в диапазоне режимных параметров $q = 5 \cdot 10^2 \dots 15 \cdot 10^5$ Вт/м² и $\Delta T = 0,5 \dots 20$ К, на установке и по методике [2].

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Предварительно выполнены контрольные опыты по кипению на технически гладкой поверхности в отсутствие поля. Полученные результаты удовлетворительно согласуются с результатами предыдущих исследований [1, 2], а также других авторов, что подтверждает корректность методики проведения экспериментов.

Влияние электрического поля на теплообмен при кипении гексана на модифицированных поверхностях показано на рис. 1. Установлено, что с увеличением напряженности поля E коэффициент теплоотдачи возрастает, наи-

*И.М. Черника, ion_cernica@yahoo.com

большого увеличения достигнута при умеренных тепловых потоках, которое доходило до 4 раз по сравнению с кипением без поля. С ростом теплового потока влияние поля ослабевает, а при высоких тепловых нагрузках коэффициент теплоотдачи практически не зависит от напряженности поля. Влияние межэлектродного расстояния на основную характеристику процесса кипения неоднозначно; максимальный эффект наблюдается при зазоре 3 мм.

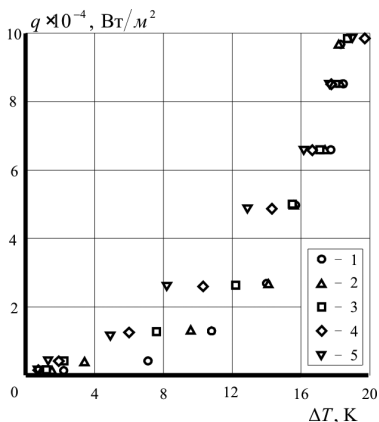


Рис. 1. Тепловые потоки при кипении гексана на модифицированных поверхностях в электрическом поле ($\delta = 3$ мм): 1 – $E = 0$; 2 – 8,33; 3 – 16,67; 4 – 25; 5 – 33,33 кВ/см

Выводы. Экспериментально установлена возможность существенной интенсификации теплообмена при кипении на модифицированных поверхностях под воздействием электрического поля.

Финансирование работы. Работа выполнена в рамках проекта ANCD 20.80009.5007.06 при поддержке правительства Республики Молдова.

Список литературы

1. Черника И.М., Болога М.К., Моторин О.В., Кожевников И.В. Интенсивность теплообмена при кипении на модифицированных поверхностях в электрическом поле // Материалы Восьмой Российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 17-22 октября 2022 г.). Т. 1. С. 290 – 291.
2. Chernica I.M., Bologa M.K., Mardarskii O.I., Kozhevnikov I.V. Action of electrohydrodynamic flow on heat transfer at boiling. Journal of Electrostatics. 2021. vol. 109. doi.org/10.1016/j.elstat.2020.103524.

I.M. Chernica, M.K. Bologa

Institute of Applied Physics
Moldova, Chisinau, MD – 2028, str. Academic, 5

PECULIARITIES OF HEAT TRANSFER AT BOILING ON MODIFIED SURFACES UNDER THE INFLUENCE OF AN ELECTRIC FIELD

Н.Е. Кикоть, П.Г. Бобылев, А.В. Павлов, С.З. Сапожников

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДОВ ТИТАНА И АЛЮМИНИЯ НА ТЕПЛОБМЕН ПРИ КИПЕНИИ НЕДОГРЕТОЙ ВОДЫ

Одним из способов интенсификации теплообмена при кипении является добавка твердых частиц микро- и нано размеров. Существует обширная экспериментальная база по интенсификации теплообмена таким образом [1], однако до сих пор нет единого мнения о влиянии частиц на теплообмен. В работе рассмотрен теплообмен при кипении недогретой воды с добавлением частиц TiO_2 и Al_2O_3 размером 54 нм.

Экспериментальная модель – цилиндр из титана ВТ22 диаметром 34 мм и высотой 22 мм. Измерение плотности теплового потока (ПТП) проводились гетерогенным градиентным датчиком теплового потока (ГДТП). Модель и методика измерений неоднократно проверены в экспериментах с чистой водой, как насыщенной, так и недогретой, а также в экспериментах с недогретой водой с добавлением микрочастиц. В предыдущих работах научной группы исследовано влияние частиц Al_2O_3 размером 1 мкм [2]. Выявлено увеличение максимальной плотности теплового потока до 5 раз, а как следствие – уменьшение времени остывания модели.

Добавка наночастиц к воде оказала негативный эффект на теплообмен. Временная теплогрaмма полученная методом градиентной теплотометрии представлена на рис. 1.

Максимальная ПТП снизилась в среднем на 12 %, по сравнению с теплообменом в чистой воде. Это связано с осаждением частиц на поверхность модели, когда формируется изоляционный слой, который препятствует контакту жидкости с поверхностью нагрева.

Теплопроводность TiO_2 и Al_2O_3 составляет 4,5 Вт/(м·К) и 25 Вт/(м·К) соответственно. Различия в теплопроводности влияют на разную величину эффекта. В экспериментах с добавлением TiO_2 наблюдается максимальное снижение максимального значения плотности теплового потока до 15 %.

Зависимость значений максимальной плотности теплового потока от величины недогрева представлена на рис. 2.

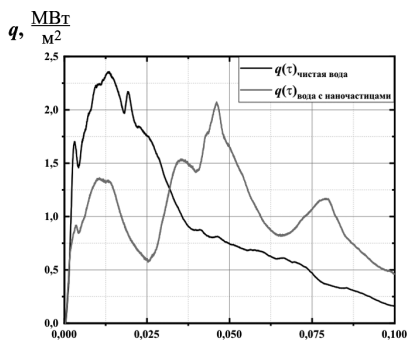


Рис. 1. Временная теплограмма теплообмена при кипении чистой воды и воды с добавлением наночастиц Al_2O_3 массовой концентрацией 0,32 % для температурного режима $t_w = 464^\circ\text{C}$ и $t_f = 64^\circ\text{C}$

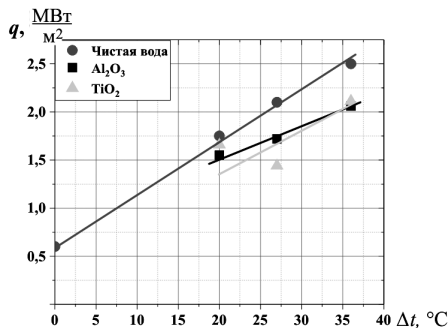


Рис.2. Зависимость местной ПТП от недогрева воды с добавлением наночастиц TiO_2 и Al_2O_3

Результаты работ, связанных с использованием в качестве интенсификаторов теплообмена при кипении частиц Al_2O_3 размером 1 мкм, [2] и новых данных с использованием TiO_2 и Al_2O_3 размером 54 нм показывают, что важнейшим фактором, влияющим на теплосъем при кипении во взвеси твердых частиц в воде, является фракционность этих частиц.

Работа поддержана грантом РФФИ № 22-29-00160.

Список литературы

1. **Dey D., Sahu D.S.** Nanofluid in the multiphase flow field and heat transfer: A review. *Heat Transfer*. 2021;50:3722 – 3775
2. **Sapozhnikov S.Z.** Enhancement of heat transfer for boiling in nanofluid / Pavel B.G., Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Yu., Pavlov A.V., Bobylev P.G., Andreev Yu.V., Proskurin V.M., Vinogradov M.D. // *SSYSS 2021, Journal of Physics: Conference Series* 2039, 2021

N.E. Kikot, P.G. Bobylev, A.V. Pavlov, S.Z. Sapozhnikov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Russia 195251, St.Petersburg, Polytechnicheskaya, 29

INFLUENCE OF TITANIUM OXIDE NANOPARTICLES AND ALUMINUM FOR HEAT TRANSFER WHEN BOILING SUBCOOLED WATER

Г.С. Маршалова^{1,2}, М.С. Лира¹, Е.С. Данильчик^{1,2}, А.А. Миронов³

*1*Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси,
РБ*, 220072, г. Минск, ул. П. Бровки, д. 15

*2*УО «Белорусский государственный технологический университет»
РБ, 220006, г. Минск, ул. Свердлова, д. 13а

*3*ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А.Н. Туполева-КАИ», 420111, г. Казань, ул. Маркса, д. 10

ВЛИЯНИЕ ВЫСОТЫ РЕБРА НА ТЕПЛОТДАЧУ АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ В РЕЖИМЕ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ

Аппараты воздушного охлаждения являются составной частью оборудования тепло-технологических процессов в нефтеперерабатывающей, химической, нефтехимической, газовой и пищевой промышленности, в тепло- и электроэнергетике, в холодильной технике и др. [1].

Для повышения эффективности аппаратов предлагается частичное отключение вентиляторов при снижении температуры окружающего воздуха до определенных значений с сохранением заданного теплового режима, то есть перевод их в режим свободной конвекции [2].

Цель работы – численное исследование влияния высоты ребра на теплоотдачу оребренных трубных пучков в режиме свободной конвекции.

Численные исследования проводились для шахматного двухрядного пучка, состоящего из оребренных труб следующих параметров: наружный диаметр трубы с оребрением $d = 0,0264-0,0568$ м; высота ребра $h = 00,0152$ м; межреберный шаг $s = 0,00243$ м; диаметр трубы по основанию $d_0 = 0,0264$ м; толщина ребра $\Delta = 0,00055$ м; коэффициент оребрения $\phi = 1-21$. Исследования проводились для различных относительных поперечных шагов $\sigma_1 = S_1 / d = 1,02-1,23$; $\sigma_2 = S_2 / d = 0,88-1,07$.

Верификация расчетных алгоритмов для численного моделирования с результатами экспериментальных исследований проводилась в [3].

Тепловая эффективность пучка определяется не только теплоотдачей, но и площадью теплообменной поверхности. Поэтому для оценки влияния относительной высоты ребра труб h / s на интенсивность теплоотдачи и сопоставления различных типов пучков по тепловой эффективности при постоянном числе Грасгофа $Gr = 250\ 000$, были построены зависимости $(Nu \phi) = f(h / s)$, представленные на рис. 1.

Г.С. Маршалова, galiana.sidorik@gmail.com

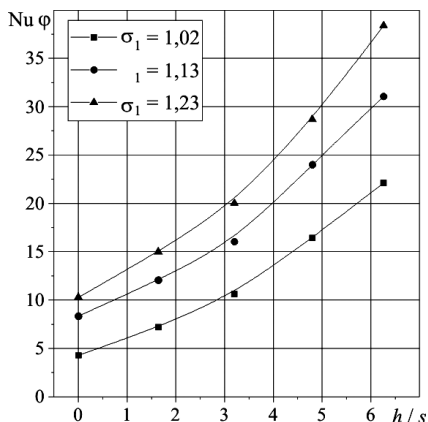


Рис. 1. Влияние относительной высоты ребра на интенсивность теплоотдачи двухрядного пучка в режиме свободной конвекции

Из представленных на рисунке 1 данных получено, что для двухрядного пучка наибольшая теплоотдача, отнесенная к поверхности труб по основанию ребер, характерна для пучка с наибольшей относительной высотой ребра и коэффициентом оребрения ($h/s = 6,26$, $\varphi = 21$). При этом для более тесных пучков теплоотдача ниже, чем для разреженных.

Список литературы

1. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения: справочник / А.Н. Бессонный [и др.]; Под ред. А.Н. Бессонного, В.Б. Кунтыша: СПб.: Недра, 1996. 512 с.
2. **Кунтыш В.Б.** Инженерный метод теплового расчета аппарата воздушного охлаждения в режиме свободно-конвективного теплообмена // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2013. № 12. С. 3 – 6.
3. **Маршалова Г.С.** Численное исследование влияния высоты ребра на теплоотдачу двухрядных трубных пучков воздушного охлаждения в режиме свободной конвекции // ВФФИ. 2022. № 3. Р. 298 – 306.

G.S. Marshalova^{1,2}, *M.S. Lira*², *E.S. Danilchik*^{1,2}, *A.A Mironov*³

¹A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus, Minsk, 220072, Brovki st.,15

²Belarusian State Technological University, Minsk, 220006, Sverdlova st., 13a

³Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI, Kazan, Russia, 420111, Marksa st., 10

THE EFFECT OF THE FIN HEIGHT ON THE HEAT TRANSFER OF AIR-COOLED APPARATUS IN THE FREE CONVECTION

П.Д. Алексеев¹, Ю.Л. Леухин¹

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова,
163002, г. Архангельск, Набережная Северной Двины, д. 17

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТРУЙНОГО МОДУЛЬНОГО РЕКУПЕРАТОРА

Струйный обдув рабочей теплопередающей поверхности находит применение в рекуперативных устройствах различного конструктивного исполнения. При этом важным негативным фактором, снижающим эффективность работы таких устройств, является наличие сносящего потока, который формируется за счет истечения струй из отверстий, расположенных вверх по потоку [1]. Сносящий поток отклоняет струи от нормального направления, снижает их импульс и, как следствие, интенсивность теплоотдачи на поверхности.

В работе рассмотрен способ управления теплоотдачей на рабочей поверхности струйного модульного рекуператора, представленного в работе [2]. Холодный воздух подается во внутреннюю трубу модуля, перфорированную выдувными отверстиями, из которой он в виде импактных струй натекает на внутреннюю вогнутую поверхность теплопередающей трубы и нагревается.

Благодаря большой относительной длине модуля, струи, вытекающие через отверстия, расположенные ближе к глухому торцу модуля, создают сносящий поток, снижающий теплоотдачу в направлении выходного отверстия. Исследования теплоотдачи выполнены численно с использованием программного комплекса ANSYS Fluent 15.0 и модели турбулентности Realizable $k-\epsilon$ (URANS). Расчет производился на неструктурированной тетраэдрической сетке с количеством ячеек равным 15 млн.

На рис. 1 приведено изменение псевдолокального коэффициента теплоотдачи (осредненного по периметру поперечного сечения) по длине рабочей поверхности модуля, выполненного в натуральную величину, со следующими геометрическими характеристиками: рабочая длина – 1389 мм, внутренний диаметр перфорированной вставки – 50 мм, толщина ее стенки – 5,25 мм, внутренний диаметр теплопередающей трубы – 100,5 мм, диаметр выдувных отверстий – 3,5 мм, количество отверстий в ряду – 5 и количество рядов – 33. Продольная координата отсчитывается от глухого торца модуля в направлении выходного отверстия. Расход воздуха через модуль равнялся $0,055 \text{ м}^3/\text{с}$.

Максимальные значения коэффициента теплоотдачи наблюдаются в критических точках натекания импактных струй на вогнутую стенку внешней

трубы, которая является рабочей поверхностью модуля. Формирование спутного потока приводит к уменьшению максимальных значений коэффициента теплоотдачи примерно на 30 %, а средних на 20 %. За счет сноса струй происходит постепенное увеличение расстояния между критическими точками. При этом сносящий поток практически не оказывает влияния на минимальные значения коэффициентов теплоотдачи между критическими точками.

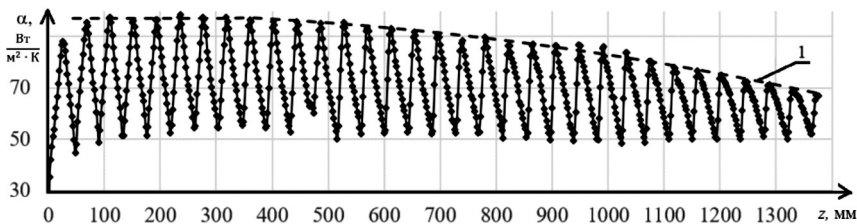


Рис. 1. Изменение псевдолокального коэффициента теплоотдачи по длине рабочей поверхности модульного рекуператора

Для изучения возможности управления теплоотдачей по длине рабочей поверхности с целью повышения ее равномерности, проведены расчеты теплоотдачи при четырех комбинациях изменяющихся по длине диаметров выдувных отверстий и неизменном расходе воздуха через модуль. Установлено, что влияние сносящего потока на теплоотдачу проявляется при коэффициенте вдува меньше 4. Получено уравнение, позволяющее учесть и компенсировать влияние сносящего потока на теплоотдачу в критических точках при различных диаметрах выдувных отверстий и их комбинациях. По полученным в работе уравнениям выполнен расчет, представленный на рис. 1 линией 1.

Список литературы

1. Конвективный теплообмен при струйном обтекании тел / Е.П. Дыбан, А.И. Мазур. Киев: Наукова думка, 1982. 302 с.
2. Исследование аэродинамики и теплоотдачи струйного модульного рекуператора / П.Д. Алексеев, Ю.Л. Леухин. Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Тезисы докладов XXIII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева (24-28 мая 2021 г., г. Екатеринбург). М.: Издательский дом МЭИ, 2021. С. 268 – 269.

P.D. Alekseev¹, Y.L. Leukhin¹

¹ Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17 Severnaya Dvina Embankment, Arkhangel'sk, 163002

IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE MODULAR JET RECUPERATOR

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КИПЕНИЯ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ПАВ В КАПИЛЛЯРНОЙ ТРУБЕ

Двухфазное охлаждение более эффективно и позволяет снизить стоимость, при этом сохранить низкие температурные градиенты в электронных компонентах [1, 2]. Задачи по интенсификации теплопередачи и переноса кризиса теплообмена в область более высоких тепловых потоков включают в себя важный элемент – испарение с поверхности. Работа пульсационной тепловой трубы основана на движении паровых и жидкостных пробок. Следовательно, испарение играет одну из важных ролей в теплообмене и теплопереносе.

Основной задачей в данной работе было измерение коэффициента теплоотдачи для капиллярной трубки с рабочей жидкостью, содержащей ПАВ.

На первом этапе исследований водные растворы ПАВ на основе SLS продемонстрировали возможные преимущества при использовании в качестве рабочей жидкости в пульсационных тепловых трубах. Данное исследование направлено на сравнение показателей, таких как размеры и форма пульсаций, в зависимости от тепловых потоков для воды и водных растворов ПАВ.

Был собран экспериментальный стенд, состоящий из капиллярной трубки, открытой в атмосферу, нагревателя, термопар К-типа и шприцевого насоса. Длина трубки 100 мм, внутренний диаметр 2 мм, внешний диаметр 4 мм. С помощью шприцевого насоса варьировался расход жидкости. В работе представлено сравнение трех расходов: 5 мл/мин, 10 мл/мин и 20 мл/мин.

В ходе работы было отмечено, что наличие ПАВ оказывает влияние на температурные пульсации на стенке нагревателя. Уменьшение амплитуды температурных пульсаций позволяет наблюдать более точно определять момент приближения кризиса. Кроме того, положительным аспектом является тенденция к уменьшению локального перегрева, а, следовательно, и понижается вероятность образования сухих пятен на стенке капиллярной трубки.

*Ю.А. Пещенюк, peschenyuk.yulya@gmail.com

Проведены эксперименты по исследованию влияния ПАВ на кипение в капиллярной трубке. Использованы три рабочие жидкости: вода, водный раствор ПАВ с концентрацией 100 ppm и водный раствор ПАВ с концентрацией 1000 ppm.

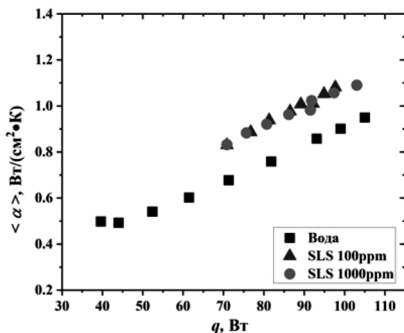


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплоотдачи от теплового потока на стенке нагревателя для расхода жидкости 20 мл/мин

Было получено, что коэффициент теплоотдачи для одинаковых тепловых потоков для растворов ПАВ выше, чем для воды (рис. 1). Амплитуда температурных колебаний для растворов ПАВ ниже, чем для воды в среднем на 5 – 10 °С при одинаковых условиях.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 20 – 79 - 10096

Список литературы

1. Сургаев А.С., Сердюков В.С., Малахов И.П., Тимошевский М.В., Сафаров А.С. Вскипание недогретой воды на микронагревателе в условиях импульсного тепловыделения // Теплофизика и аэромеханика. 2020. Т. 27, №. 5. С. 823 – 826.

2. Люлин Ю. В., Кабов О. А., Кузнецов Г. В., Феоктистов Д. В., Пономарев К. О. Влияние протяжённости межфазной поверхности на интенсивность испарения горизонтального слоя жидкости под действием потока газа // Теплофизика и аэромеханика. 2020. Т. 27. №. 1. С. 121 – 125.

Y.A. Peschenyuk^{1,2}, I.S. Vozhakov^{1,2}

¹ Institute of Thermal Physics SB RAS,
Russia, Novosibirsk, 630090, Lavrentyev Prospekt, 1

² Novosibirsk State University,
Russia, Novosibirsk, 630090, st. Pirogova, 1

INVESTIGATION OF THE PROCESS OF BOILING AQUEOUS SOLUTIONS OF SURFACTANTS IN A CAPILLARY PIPE

А.В. Барсуков, В.В. Терехов, В.И. Терехов

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛОБМЕНА В КОМПЛАНАРНЫХ КАНАЛАХ

Актуальность исследований сложных турбулентных отрывных течений обусловлена, прежде всего, практическими приложениями [1-3]. Действительно, повышение эффективности теплообменного оборудования, широко используемого в промышленности, является одной из важнейших задач современной теплофизики. Особенно актуальными является создание новых методов управления теплообменом в таких течениях, разработка инженерным методом для проектирования теплообменных устройств с заданными характеристиками, обладающих высокой термодинамической эффективностью. В качестве методов повышения интенсивности теплообмена используются пассивные вихрегенераторы различных форм, например наклонные ребра, лунки, уступы, табы, компланарные каналы и т.д.

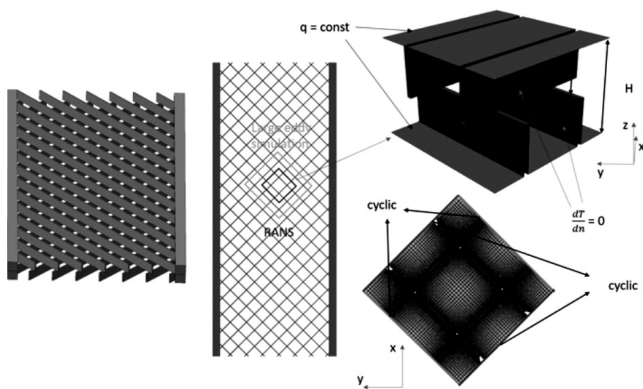


Рис. 1. Схема расчетной области

В данной работе большое внимание уделяется механизму перетекания потоков при отсутствии влияния боковых стенок канала. Представлены результаты численного расчета методом RANS и LES отрывного турбулентного течения в компланарном канале с использованием пакета OpenFOAM.

Расчет был выполнен для углов скрещивания $2\beta = 60 \div 120$ и числа Рейнольдса $Re = 5\,000 \div 15\,000$, определенного по среднерасходной скорости и высоте канала (рис. 1).

Было показано, что газовый поток в верхней и нижней половине канала движется вдоль подканалов. При этом данный поток является закрученным. Верхняя часть нижнего потока сталкивается нижней частью на верхней стенке и часть потока переходит наверх, при этом закручивая верхний поток. Так же было показано, что распределение скорости симметричное, поскольку происходит взаимное закручивание потоков. С увеличением угла скрещивания увеличивается взаимодействие потоков нижнего подканала с потоками верхних подканалов. Наибольшее среднее значение числа Нуссельта достигается для угла скрещивания в 120

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2021-575).

Список литературы

1. **Mousa M.H., Miljkovic N., and Nawaz K.** Review of heat transfer enhancement techniques for single phase flows // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. Vol. 137. pp. 110566.
2. **Vaferi K., Nekahi S., Vajdi M., Moghanlou F.S., Asl M.S.** Heat transfer, thermal stress and failure analyses in a TiB₂ gas turbine stator blade // Ceramics International. 2019. Vol. 45. pp. 19331-19339.
3. **Liang C., Rao Y., Luo J., and Luo X.** Experimental and Numerical Study of Turbulent Flow and Heat Transfer in a Wedge-shaped Channel with Guiding Pin Fins for Turbine Blade Trailing Edge Cooling // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021. Vol. 178.

A.V. Barsukov, V.V. Terekhov, V.I. Terekhov

Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the RAS,
Russia 630090 Novosibirsk, 1, Ac. Lavrentieva ave.

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE FEATURES OF FORMATION OF THE FLOW STRUCTURE AND HEAT TRANSFER IN COMPLANAR CHANNELS

В.Ю. Владимиров¹, Е.А. Чиннов¹, С.Я. Хмель¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе,
630090, г. Новосибирск, ул. Лаврентьева, 1

ВЛИЯНИЕ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ СУПЕРГИДРОФОБНЫМИ КАВЕРНАМИ НА МЕДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ

Перспективным подходом для интенсификации теплообмена при кипении является создание бифильных поверхностей. Такие поверхности имеют обычно в целом гидрофильную/супергидрофильную основу с локальными гидрофобными/супергидрофобными областями, служащими эффективными центрами парообразования. Такие поверхности характеризуются степенью гидрофобности (или *area ratio*) – отношением совокупной площади всех гидрофобных областей ко всей площади поверхности, а так же размерами гидрофобных областей и шагом между ними. Детальных исследований влияния степени гидрофобности на интенсивность теплообмена при кипении мало. Существуют такие работы для кремниевых [1] и алюминиевых [2] подложек. Сравнение вышеуказанных работ демонстрирует существенное влияние материала подложки на оптимальное значение степени гидрофобности. Стоит отметить, что подавляющее большинство исследований проводится на в плоских поверхностях без выраженного рельефа, не считая шероховатости.

В данной работе исследовался теплообмен при кипении в воде при атмосферном давлении на медных поверхностях малого размера (5 мм) с массивами супергидрофобных каверн. Каверны получались методом лазерной абляции. После абляции производилось осаждение гидрофобного покрытия [3]. Испытывалось несколько образцов с разными параметрами созданных лазерной абляцией каверн. Три образца имели разные размеры каверн, при этом шаг между кавернами (780 мкм) оставался неизменным. Четвертый образец имел, помимо меньшего размера каверн, меньший (200 мкм) шаг между кавернами по сравнению с предыдущими образцами. На всех четырех образцах достигнута существенная интенсификация теплообмена по сравнению с гладкими медными поверхностями. Однако, вопреки литературным данным [1, 2], размер гидрофобных областей (каверн) не оказал влияния на интенсивность теплообмена при одинаковом шаге. Предполагается, что причиной является форма сечения этих областей (каверны, а не плоские пятна, как в [1 и 2] и в большинстве других работ) и их достаточно малый размер, в результате чего гидрофобные каверны заполняются паром. Четвертый образец с шагом между кавернами 200 мкм продемонстрировал интенсивность теплообмена до трех раз большую, по сравнению с остальными образ-

нами и до десяти раз большую по сравнению с гладкой медью. При этом степени гидрофобности всех четырех образцов не превосходят 5 %. Помимо этого интенсивность теплообмена при кипении на данном образце превосходит результаты, полученные ранее на плоских бифильных поверхностях с аналогичными размерами гидрофобных областей и шагом между ними [4].

Таким образом показано преимущество использования бифильных поверхностей с гидрофобными областями в виде каверн по сравнению с ранее исследованными плоскими бифильными поверхностями. Так же показана возможность достижения значительной интенсификации теплообмена при кипении на бифильных поверхностях даже при малой степени гидрофобности. При этом, в случае использования бифильных поверхностей с супергидрофобными кавернами, влияние на интенсивность теплообмена оказывает не размер каверн, а шаг между ними и, таким образом, количество каверн.

Исследованные в данной работе поверхности в ходе многолетних испытаний продемонстрировали высокую стабильность и сохранили изначально высокую интенсивность теплообмена. Дополнительные эксперименты показали ключевую роль именно супергидрофобных свойств каверн в интенсификации теплообмена, а не самих каверн как таковых.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22 19 20090, <https://rscf.ru/project/22-19-20090> / при финансовой поддержке Правительства Новосибирской области [соглашение № р-13].

Список литературы

1. **Motezakker A. R. et al.** Optimum ratio of hydrophobic to hydrophilic areas of biphilic surfaces in thermal fluid systems involving boiling // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. Т. 135. С. 164 – 174.
2. **Moze M., Zupancic M., Golobic I.** Pattern geometry optimization on superbiphilic aluminum surfaces for enhanced pool boiling heat transfer // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. Т. 161. С. 120265.
3. **Boinovich L. B. et al.** Pulsed laser induced triple layer copper oxide structure for durable polyfunctionality of superhydrophobic coatings // Advanced Materials Interfaces. 2018. Т. 5. №. 21. С. 1801099.
4. **E.A. Chinnov et al.** Boiling heat transfer enhancement on biphilic surfaces / Energies, 2022, Т. 15, С. 7296.

V. Yu. Vladimirov¹, E.A. Chinnov¹, S. Ya. Khmel¹

¹ Kutateladze Institute of thermophysics,
Russia 630090 Novosibirsk, Lavrentyeva, 1

THE INFLUENCE OF PITCH BETWEEN SUPERHYDROPHOBIC CAVERNS ON COPPER SURFACE ON BOILING HEAT TRANSFER

Т.А. Губанова¹, А.Р. Забиров^{1,2}, В.В. Ягов¹

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14 *

² Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН),
125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2

ОХЛАЖДЕНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕЛ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СТРУИ НЕДОГРЕТОЙ ЖИДКОСТИ

В технологии закалки наиболее широко сейчас применяется струйное охлаждение. При нагреве металла до высоких температур происходят фазовые изменения, в результате которых и происходит термоупрочнение. Но при медленной скорости охлаждения процесс обратим. Крайне необходимо охлаждать металл быстро, чему и способствуют устройства-распылители или массивы струй. Имеется множество научных исследований, направленных на понимание механизма процесса струйного охлаждения. Существует некоторое количество эмпирических моделей, основанных на множестве полученных экспериментальных результатов. Но четкого понимания того, какие параметры и свойства оказывают непосредственное влияние на процесс, на данный момент нет. Конфигурация охлаждения затопленной струей просто является наименее исследованной.

Впервые процессы охлаждения металлических шаров при определенных режимах кипения были рассмотрены в целях изучения механизмов такого явления, как «паровой взрыв» (Д. Кеннинг, Г. Хьюитт) [1]. Именно тогда и был обнаружен особый режим кипения – микропузырьковое кипение. Исследования показали, что интенсивность охлаждения в этом режиме на порядок выше, чем при обычном пленочном кипении насыщенной жидкости, что говорит о существенной разнице между этими процессами.

В одной из последних работ [2] описываются процессы кипения при соударении насыщенной водяной струи о нагретую выше 500 °С стальную пластину. Было отмечено, что после длительного пленочного кипения паровая пленка разрушалась при температурах поверхности близкой к температуре предельного перегрева жидкости T_{lim} . Закалка обработанных пескоструйной обработкой поверхностей показала повышенную температуру повторного смачивания по сравнению с гладкими поверхностями. Это означает, что дефекты в стальной пластине могут способствовать локальному повторному

*Т.А. Губанова, gubanova.ta@mail.ru

смачиванию. Воздействие струи интенсифицирует процесс охлаждения из-за воздействия на паровую пленку, в результате чего увеличивается число и суммарная площадь контактов жидкости с выступами шероховатости поверхности. Понятно, что местное охлаждение усиливается.

Подобные выводы были сделаны на основе экспериментов, проведенных на кафедре ИТФ МЭИ. В данной работе приведены результаты опытов по охлаждению металлических образцов струей охлаждающей жидкости в виде термограмм охлаждения (пример термограммы на рис. 1).

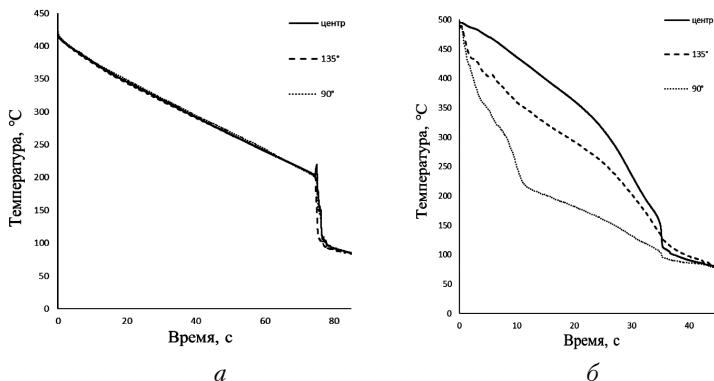


Рис. 1. Охлаждение никелевого шара в этаноле при температуре жидкости +30 °С:

а – без влияния затопленной струи; *б* – с влиянием затопленной струи

Список литературы

1. **Aziz G.F., Hewitt and D.B.R. Kenning.** Heat transfer regimes in forced convection film boiling on spheres, International Heat Transfer Conference Digital Library, Begel House Inc., 1986.
2. **Leocadio H., Van Der Geld C.W.M. & Passos J.C.** Rewetting and boiling in jet impingement on high temperature steel surface, Physics of Fluids, vol. 30(12). 2018. P. 122102.

*T.A. Gubanova*¹, *A.R. Zabirov*^{1,2}, *V.V. Yagov*¹

¹ National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,
Russia 111250 Moscow, Krasnokazarmennaya 14

² Joint Institute of High Temperature,
Russia, 125412 Moscow, Izhorskaya st. 13 Bd.2

COOLING OF HIGH-TEMPERATURE BODIES UNDER THE INFLUENCE OF SUBCOOLED LIQUID JET

Ю.А. Пещенюк^{1,2}, А.А. Семенов^{1,2}, Е.Я. Гатапова^{1,2}

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

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОСЛЕДНЕЙ СТАДИИ ИСПАРЕНИЯ ПЛОСКОЙ КАПЛИ МОДЕРНИЗИРОВАННЫМ ШЛИРЕН МЕТОДОМ

Разработка методов измерения толщины пленки жидкости и деформаций ее поверхности является особенно актуальным для микроразмерных капель. Для получения двухмерных и трехмерных характеристик быстро испаряющихся тонких капель жидкости применяются различные оптические методы.

В данной работе использовалась одна из модификаций шлирен – метода со ступенчатым градиентным фильтром с семью ступенями серого. Шлирен-метод с градуированным / кодирующим / ступенчатым или плавно регулируемым фильтром нейтральной плотности был изобретен Нортон в 1952 г. Использование ступенчатого фильтра обеспечивает более четкое изображение с лучшим пространственным разрешением [1]. В качестве подложки использовался черный кремний (b-Si). Оптическая схема представлена на рис. 1.

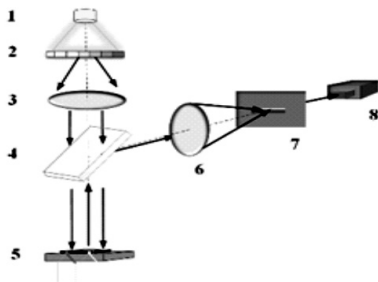


Рис. 1. Оптическая схема шлирен – визуализации: 1 – источник света; 2 – ступенчатый фильтр и матовая пластинка; 3 – коллимирующая линза; 4 – лучевой делитель; 5 – система, состоящая из подложки и нагревателя; 6 – шлирен линза; 7 – шлирен фильтр; 8 – камера

Для обработки полученных данных была разработана программа в среде программирования Matlab. С помощью предварительной калибровки изображения в виде матриц со значениями интенсивности 256 оттенков серого были сопоставлены с характерными значениями углов. Значения измеряемых углов лежат в диапазоне $[-5^\circ, 5^\circ]$. Далее был произведен расчет толщи-

ны тонкой пленки, площади поверхности и объем методом элементарных параллелепипедов.

Были рассчитаны профили толщины для капель воды при различных температурах, которые дают качественное и количественное представление о двухмерных и трехмерных деформациях поверхности. Также проведен программный расчет скорости контактной линии и удельной скорости испарения с единицы поверхности.

Кроме того, асимптотика удельной скорости испарения на заключительном этапе была представлена в работе [2] и хорошо согласуется с результатами полученными в данной работе (рис. 2), [3]. Что свидетельствует о возможном дальнейшем применении разработанной системы измерения.

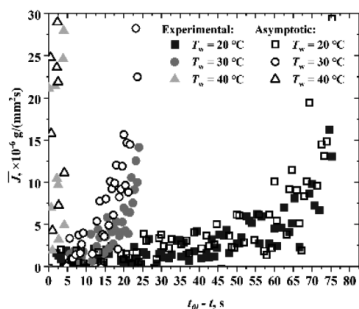


Рис. 2. Удельная скорость испарения на конечной стадии испарения капля воды при различных температурах подложки. Здесь t_{oi} – общее время измерения для каждого экспериментального режима, соответственно $t_{oi} - t$ – реальное время измерений

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00722).

Список литературы

1. **Settles G.S.** Schlieren and shadowgraph techniques: visualizing phenomena in transparent media. Springer Science & Business Media, 2001.
2. **Gatapova E.Y. et al.** Evaporation dynamics of a sessile droplet on glass surfaces with fluoropolymer coatings: focusing on the final stage of thin droplet evaporation //Soft Matter. 2018. Т. 14. №. 10. С. 1811 – 1821.
3. **Peschenyuk Y.A. et al.** The final stage of droplet evaporation on black silicon by schlieren technique with a graded filter // Experiments in Fluids. 2023. Т. 64. №. 1. С. 1.

Y.A. Peschenyuk^{1,2}, A.A. Semenov^{1,2}, E.Y. Gatapova^{1,2}

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS
Russia, Novosibirsk, 630090, Lavrentyev Avenue, 1

² Novosibirsk State University, Russia, Novosibirsk, 630090, st. Pirogova, 1

INVESTIGATION OF THE LAST STAGE OF EVAPORATION OF A FLAT DROP BY THE MODERNIZED SCHLIEREN METHOD

А.В. Бездудный¹

¹ Объединенный институт высоких температур РАН,
111116, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 17А

СИСТЕМА ЦИКЛИЧЕСКОГО ХРАНЕНИЯ ТЕПЛОЙ ЭНЕРГИИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ НА БАЗЕ МЕТАЛЛОГИДРИДНОГО УСТРОЙСТВА

Солнечная энергия, стоящая в одном ряду с другими источниками возобновляемой энергии, является относительно простой для практического использования. В основном, в качестве систем получения энергии из солнца, используются объединения солнечных фотоэлектрических преобразователей (солнечные панели) и солнечные коллекторы (концентраторные солнечные установки).

Одним из методов компенсации неравномерности генерации энергии этих установок является интеграция в состав солнечного коллектора системы хранения тепловой энергии (ХТЭ), что обеспечит устойчивую выработку энергии всей энергоустановкой в течение 24-часов.

Системы на основе солнечных коллекторов, интегрированные с устройствами ХТЭ, могут быть оптимальны по стоимости и могут обеспечивать непрерывное производство электроэнергии даже в отсутствии солнечного излучения [1].

Металлогидридные системы, рассматриваемые в качестве обратимых систем хранения тепла, способны запастись тепловой энергией с массовой плотностью до 2 МДж/кг [2]. Полезное тепло высвобождается при подаче водорода в объем металлогидридной системы. При работе металлогидридного устройства в качестве системы ХТЭ водород находится внутри замкнутого контура, поэтому его можно использовать в большом количестве циклов заряда-разряда для хранения тепловой энергии. Тепловая мощность металлогидридной системы и её температурные режимы могут быть скорректированы изменением параметров расхода газа и давления в газовой подсистеме. Регенерация системы производится при наличии внешнего источника тепла, путём нагрева металлогидрида для обеспечения реакции десорбции водорода в газовую подсистему.

Были проведены исследования одноступенчатой термохимической системы ХТЭ на базе низкотемпературного металлогидрида с целью определить потенциал данного класса материалов в качестве основы для создания низкотемпературных реакторов, способных работать в диапазоне температур 0-

100°C. Требовалось оценить диапазон рабочей ёмкости реактора, циклическую стабильность, динамику реакции и рабочие давления. Варьирование состава ИМС позволяет получить сплав, удовлетворяющий необходимым требованиям по параметрам давления сорбции/десорбции в температурной области от 0 до 100°C, которые обеспечивают функционирование системы хранения тепловой энергии. Сплав состава LaFe_{0.1}Mn_{0.3}Ni_{4.8} был выбран на основе подходящих параметров давление-концентрация-температура (PCT-диаграммы): давление в системе не более 13 атм. при комнатной температуре и температурные параметры системы охлаждения/нагрева 20 – 90 °С.

Динамика реакции может быть существенно улучшена путем внедрения более эффективных решений по обеспечению теплообмена между засыпкой ИМС и хладагентом. Так как активированный работающий металлгидрид представляет собой мелкодисперсный порошок с очень низкой эффективной теплопроводностью, то для интенсификации теплообмена возможно внедрение в объем засыпки пеноматериалов из высокотеплопроводных металлов (медь, алюминий), уменьшение толщины сорбирующего слоя металлгидрида в реакторе, добавление внутреннего оребрения теплообменника, при котором рёбра будут проникать внутрь засыпки ИМС, либо комплексное применение всех вышеперечисленных методов. Использование пеноматериалов осложняется проблемой первичного равномерного распределения частиц ИМС по объему пеноматрицы внутри реактора, для преодоления которой нужно использовать вибростенды, что едва ли практично для потенциальных реакторов большого объема из-за затруднений, связанных с их размерами и весом. Применение внутреннего оребрения связано со сложностью в конструировании и стоимости подобных типов МГ-реакторов. Наиболее доступной для реализации остаётся уменьшение толщины сорбирующего слоя и использование теплообменников типа труба в трубе.

Список литературы

1. **Бабаев Б.Д.** Принципы теплового аккумулирования и используемые теплоакумулирующие материалы // Теплофизика высоких температур, 2014. Т. 52. № 5. С. 760 – 776.
2. **Reiser A., Begdavonic B., Schliche K.** The application of Mg based metal hydrides as heat energy storage systems. Int J Hydrogen Energy 2000; 25:425e30

A. V. Bezudnyj¹

¹ Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences,
Russia, 111116 Moscow, Krasnokazarmennaya, 17A

**METAL HYDRIDE-BASED LOW POWER CYCLIC THERMAL
ENERGY STORAGE SYSTEM**

ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМЫ ГАЗОУДАЛЕНИЯ В КОНДЕНСАТОРАХ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТУРБОМАШИН С УТИЛИЗАЦИЕЙ СО₂

При сжигании метана и кислорода в среде водяного пара после котла можно значительно увеличить максимальную температуру перегрева до 1500 °С и КПД цикла до 52 %. Однако в конденсатор поступает смесь пара с неконденсирующимися продуктами сгорания, в результате чего вакуум ухудшается, а следовательно и работа энергоустановки. Работа конденсатора с содержанием неконденсирующихся газов (НKG) более 10% имеет свои особенности, в том числе совместная работа с газоудаляющим устройством. У современных газоудаляющих устройств конструкции не рассчитаны на эффективную работу при высоком содержании НКГ. Поэтому оптимизация работы конденсатор – газоудаляющее устройство является актуальной задачей.

Обзор конденсационных установок для парогазовой смеси с системами газоудаления. Величина оптимального давления в конденсаторе зависит от массовой доли СО₂ в продуктах сгорания, от температуры парогазовой смеси на выходе из турбины и т.д [1]. При углублении вакуума увеличиваются затраты на газоудаление из конденсатора, в связи с чем применение традиционных для паротурбостроения эжекторов становится неоправданным по соображениям экономичности. Большие объемные расходы удаляемых газов требуют использования в системе газоудаления осевых и центробежных компрессоров, а заметные в общем балансе мощностей энергозатраты на газоудаление заставляют применять процесс сжатия с промежуточным охлаждением [2].

В патентах иностранных ученых представлены: система эффективного разделения и вакуумной конденсации для НКГ; использование неконденсирующихся газов снаружи горизонтальной трубы для усиления конденсации и теплообмена; устройство для конденсации парогазовой смеси, содержащей многокомпонентные неконденсирующиеся газы; система предотвращения возгорания НКГ; принцип предотвращения слива капель воды, сопровождающих неконденсирующиеся газы из секции охлаждения газа; пример использования трубки Вентури, позволяющий увеличить конденсацию пара за счет эффекта кавитации; теплообменный аппарат, позволяющий увеличить ско-

рость потока газовой смеси конденсирующихся газов и НКГ, поступающего за счет естественной циркуляции. Для удаления НКГ в работах отечественных ученых представлены эжекторы.

Утилизация CO₂. Если рассматривать установки с внутренним сжижением топлива то их преимуществом является упрощенная утилизации CO₂. Неконденсирующиеся газы (в основном CO₂) удаляются из цикла в конденсаторе, сжимаются до необходимого давления и растворяются в воде. Полученный раствор можно закачать в скважину на глубину 300÷500 м, а затем связать CO₂ с содержащими кальций минералами с последующим образованием карбонатов. На выходе из энергоустановки выделяется углекислый газ с минимальным количеством примесей, что упрощает его утилизацию по сравнению с ПГУ.

Экспериментальный стенд. В [3] описана конструкция модуля высокоэффективного конденсатора пара с большим (до 15 %) содержанием (НКГ), разработанного в ЗАО НПВП «Турбокон» (авторское свидетельство СССР № 1725056) обеспечивающего примерно постоянную скорость парогазовой смеси по мере конденсации пара. Данный экспериментальный стенд доработан для проведения испытаний с целью исследования и совершенствования системы газоудаления, получены экспериментальные данные.

Список литературы

1. **Мильман, О.О.** Система отвода тепла и параметры термодинамических циклов высокотемпературных турбин при сжигании природного газа с кислородом в среде водяного пара / О.О. Мильман, А.В. Птахин, Б.А. Шифрин // Труды Шестой Российской национальной конференции по теплообмену, Москва, 27 – 31 октября 2014 года. М.: Издательский дом МЭИ, 2014. С. 466 – 468.

2. **Мильман, О.О.** Высокотемпературная паротурбинная установка на природном газе / О.О. Мильман, Б.А. Шифрин // Водородные энергетические технологии: Материалы семинара лаборатории ВЭТ ОИВТ РАН: сборник научных трудов / Редколлегия: Д.О. Дуников (отв. ред.) [и др.]. М.: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, 2017. С. 143 – 149.

3. Высокоэффективный конденсатор пара из парогазовой смеси / О.О. Мильман, В. С. Крылов, А. В. Птахин [и др.] // Теплоэнергетика. 2017. № 12. С. 16 – 26.

*A.Yu. Kartuesova, A.A. Petrushin, A.V. Ptakhin, V.S. Krylov,
P.Yu. Dneprovskaya*

ZAO NPVP Turbocon, Kaluga, 248010 Russia

FEATURES OF THE GAS REMOVAL SYSTEM IN STEAM-GAS MIXTURE CONDENSERS FOR HIGH-TEMPERATURE TURBOMACHINES WITH CO₂ UTILIZATION

А.О. Полуянов, И.В. Колесниченко

Институт механики сплошных сред УрО РАН,
614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1*

ГЕНЕРАЦИЯ ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ ПЕРЕМЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Генерация вихревых течений в электропроводной среде с помощью бесконтактного воздействия широко применяется в задачах металлургии и энергетики. Например, это течение может избирательно действовать на компоненты многофазной среды в задачах электромагнитной сепарации [1]. Другим примером, где может применяться генерация вихревого течения, является смеситель разнотемпературных потоков теплоносителя [2]. Применение подобных устройств актуально в жидкометаллических натриевых контурах реакторов на быстрых нейтронах [3]. При возврате охлаждённого жидкого натрия в основной трубопровод, возникают гидродинамические пульсации скорости, которые при смешении разнотемпературных потоков приводят к пульсациям температуры в зоне смешения. Они могут приводить к термочиклической усталости материала стенки канала и трещинам. Возникает опасность утечки жидкого едкого натрия [4]. Результаты работы актуальны в том числе для разработки способа уменьшения влияния пульсаций при помощи неинвазивной методики генерации электромагнитных сил и вихревого течения.

Рассматривается конфигурация, состоящая из короткого соленоида, подключенного к источнику переменного тока с заданной силой и частотой. Внутри соленоида помещается цилиндрическая ячейка, заполненная электропроводной жидкостью. Через ячейку возможно наличие транзитного течения, которое формируется с помощью малой цилиндрической трубки-вставки, в которую затекает жидкость с одного торца ячейки, а вытекает через другой торец ячейки.

Жидкий металл пронизывается магнитным полем с переменным потоком, что приводит к генерации вихревого электрического тока. Взаимодействие магнитного поля и вихревого тока приводит к генерации радиальной электромагнитной силы. В данной задаче рассматривается короткий соленоид

*А.О. Полуянов, poluyanov.a@icmm.ru

и цилиндр с проводящей жидкостью, поэтому электромагнитная сила будет иметь вихревую компоненту, благодаря которой будет возникать необходимое для перемешивания вихревое течение.

Это вихревое течение, а также его взаимодействие с транзитным течением изучается путем математического моделирования. Модель сформулирована на основе уравнений магнитной гидродинамики в безындукционном приближении. Турбулентность описывается с помощью полуэмпирического подхода. Численное моделирование проводится в пакете Ansys Emag и Fluent. Показано, что азимутальная компонента энергии значительно меньше поперечной компоненты энергии. Изучены поля скорости вихревого течения, а также поля скорости для случая влияния вихревого течения на транзитное. Результаты позволяют подобрать параметры, необходимые при разработке электромагнитных аппаратов для воздействия как на двухфазную электромагнитную среду, так и на неизотермический поток для снижения температурных пульсаций в зоне смешения.

Исследование выполняется за счет гранта Российского научного фонда и Пермского края № 22-19-20106, <https://rscf.ru/project/22-19-20106/>.

Список литературы

1. **Повх И.Л., Чекин Б.В.** Магнитогидродинамическая сепарация. Киев: «Наукова думка», 1978. 148 с.
2. **Колесниченко И., Фрик П., Халилов Р., Павлинов А., Мамыкин А., Шестаков А., Васильев А., Крылов А., Пахолков В., Рогожкин С.** Смешение разнотемпературных потоков жидкого натрия в Т-образном соединении цилиндрических каналов // Теплоэнергетика, 2023.
3. **Архинов В.М.** Техника работы с натрием на АЭС. М. Энергоатомиздат, 1986. Р. 136.
4. **Кузнецов И., Поплавский В.** Безопасность АЭС с реакторами на быстрых нейтронах. М.: ИздАт, 2012. С. 632.

A. O. Poluianov, I. V. Kolesnichenko

Institute of continuous media mechanics UB RAS,
Russia, 614013 Perm, Academician Korolev Street, 1

**GENERATION OF THE MIXING FLOW OF A LIQUID-METAL
HEAT CARRIER USING AN ALTERNATING MAGNETIC FIELD**

Б.А. Абсадилов¹, Ш.К. Агзамов²

¹ АО «OZLITINEFTGAZ»,

Ташкент, 100029, ул. Тараса Шевченко, д. 2

² ПИИ ООО «UZLITI ENGINEERING», Ташкент, ул. Амира Темура, д. 129 Б

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ РАБОТЫ АВО ПРИ ПОДГОТОВКЕ ГАЗА К ТРАНСПОРТУ

Аннотация. На объектах подготовки газа к транспорту, процессы охлаждения имеют важное значение. Приведены результаты исследований интенсификации работы промышленных АВО.

Введение. К 2030 году добыча природного газа по Узбекистану планируется в объеме 66,1 млрд. куб. м. Потребление достигнет 56,5 млрд. куб. м, что означает переход к первостепенности удовлетворения спроса со стороны внутренних потребителей и глубокой переработки природного газа как сырья [1]. Вопросы оптимизации конструкций теплообменного оборудования, весьма актуальны, поскольку в условиях Центральной Азии при общем дефиците воды увеличение её расхода на промышленные нужды крайне нежелательно. Снижения энергопотребления промышленных АВО в жаркое время года, можно достичь различными способами, в том числе за счёт установки системы увлажнения воздуха.

Экспериментальное исследование процесса воздушно-водоиспарительного охлаждения в АВО. Авторами проведены исследования [2, 3] интенсификации охлаждения технологических сред на экспериментальной установке, моделирующей работу АВО. Эксперименты были проведены в широком интервале изменения параметров [2]. На рис. 1 приведены сравнительные графики эффективности теплоотдачи со стороны воздуха в виде $\alpha'_v = f(\text{Rev}, t_r)$. Построены графики зависимостей для различных величин Rev в виде $\alpha'_v = f(\text{Rev})$. Из графиков видно, что теплоотдача при охлаждении аминового раствора эффективнее при более высокой температуре раствора на входе в теплообменные секции АВО. Так, при $t_r = 40^\circ\text{C}$ величина α'_v составила 1,71 – 2,1; при $t_r = 60^\circ\text{C}$ эффект увеличился до $\alpha'_v = 1,8 – 2,2$; при $t_r = 80^\circ\text{C}$ теплоотдача со стороны воздуха увеличилась в $\alpha'_v = 2,1 – 3,0$ раза.

Закключение. Выполнены экспериментальные исследования влияния воздушно-водоиспарительного охлаждения на эффективность работы АВО. Исследовано адиабатическое охлаждение воздуха путем впрыска в поток воздуха воды с помощью форсунок. Исследован теплообмен при охлаждении аминового раствора при «сухом» воздушном и воздушно – водоиспарительном охлаждении. В зависимости от величины «с», температура охлаждающего воздуха снижается на 8-19 °С.

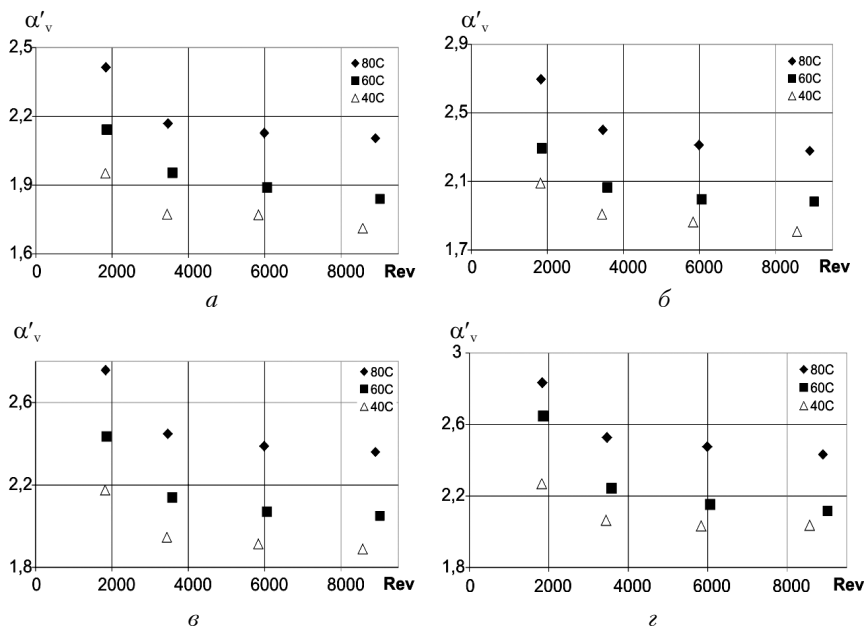


Рис. 1. Сравнение эффективности теплоотдачи воздуха в виде зависимости: $\alpha'_v = f(\text{Rev})$, $c_p = 20\%$; $\rho = 0,004$ кг/кг.
 а – $\text{Rem} \approx 2200$; б – $\text{Rem} \approx 3700$; в – $\text{Rem} \approx 5600$; г – $\text{Rem} \approx 8000$

Список литературы

1. <https://minenergy.uz/ru/news/view/1639>. Нефтегазовая отрасль Узбекистана: переход на рыночные отношения путем трансформации.

2. Абсадиқов Б.А., Агзамов Ш.К. Исследование процесса воздушно-водоиспарительного охлаждения в аппаратах воздушно-водного охлаждения / Научно-технический журнал «Технологии нефти и газа» №3. М., 2020. С. 61 – 64. DOI: 10.32935/1815-2600-2020-128-3-61-64.

3. Абсадиқов Б.А., Агзамов Ш.К. Исследование теплофизических свойств аминного раствора при воздушно-водоиспарительном охлаждении / Научные труды АО «O'ZLITINEFTGAZ». Вып. 1. Ташкент, «Innovatsiya-Ziyo», 2021. С. 250 – 257.

B.A. Absadikov¹, Sh.K. Agzamov²

¹ JSC «O'ZLITINEFTGAZ», Uzbekistan, 100029 Tashkent, Taras Shevchenko str. 2

² FIE «UZLITI ENGINEERING» LLC, Uzbekistan, Tashkent, Amir Temur str. 129 B

INTENSIFICATION OF AIR COOLING APPARATUS OPERATION DURING GAS PREPARATION FOR TRANSPORTATION

Н.С. Гибанов, М.А. Шеремет

Томский государственный университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 36

ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ КАНАЛА НА РЕЖИМЫ СМЕШАННОЙ КОНВЕКЦИИ ПРИ НАЛИЧИИ НАГРЕВАТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА И ТЕПЛОТВОДЯЩИХ РЕБЕР

В настоящей работе рассматривается задача отведения тепла от поверхности тепловыделяющего элемента. Область исследования представляет собой прямоугольный пространственный канал с длиной $3L$, шириной и высотой L . На расстоянии $L/2$ от входа в канал располагается источник постоянного объёмного тепловыделения с длиной $L/2$, расположенный на нижней границе и по ширине заполняющий весь канал. Для увеличения эффективности теплоотвода на поверхности нагревателя располагаются две теплопроводные вставки. На входе в канал подаётся поток несжимаемой теплопроводной жидкости с постоянными теплофизическими свойствами.

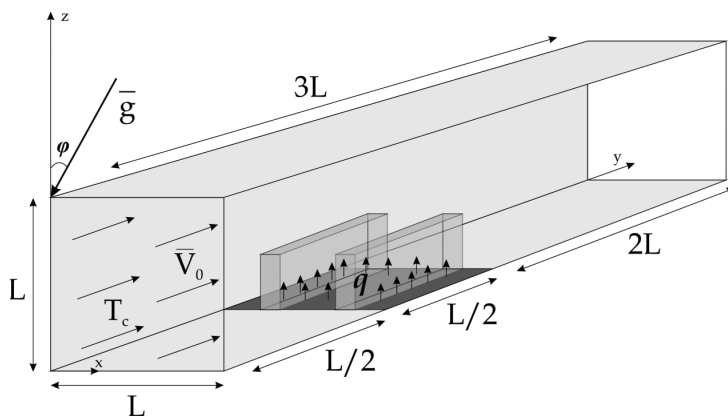


Рис. 1. Область исследования

Система уравнений, определяющая процесс сопряжённой смешанной конвекции в представленной на рис. 1 области, выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial \bar{\Omega}}{\partial \tau} + (\bar{V} \cdot \nabla) \bar{\Omega} - (\bar{\Omega} \cdot \nabla) \bar{V} = \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 \bar{\Omega} + \frac{\text{Ra}}{\text{Pr} \cdot \text{Re}^2} \bar{M}$$

$$\text{rot} \bar{\Omega} = -\nabla^2 \bar{V}, \quad \bar{M} = \left\{ -\cos(\varphi) \frac{\partial \Theta}{\partial Y} + \sin(\varphi) \frac{\partial \Theta}{\partial Z}, \cos(\varphi) \frac{\partial \Theta}{\partial X}, -\sin(\varphi) \frac{\partial \Theta}{\partial X} \right\}$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + (\bar{V} \cdot \nabla) \Theta = \frac{1}{\text{Pr} \cdot \text{Re}} \nabla^2 \Theta, \quad \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \frac{a_s/a_f}{\text{Pr} \cdot \text{Re}} \nabla^2 \Theta$$

В момент времени $\tau = 0$ среда в канале находится в состоянии покоя и безразмерная температура $\Theta = 0$.

Значения компонент вектора скорости $U = W = 0$ на всех границах канала и рёбер. На входе $V = V_0$, на выходе $\frac{\partial V}{\partial Y} = 0$. Стенки области адиабатические, на входе в канал $\Theta = 0$, на выходе $\frac{\partial \Theta}{\partial Y} = 0$, на поверхности нагревателя $\frac{\partial \Theta}{\partial Z} = -1$, на поверхности рёбер: $\Theta_s = \Theta_f$, $\frac{\lambda_s}{\lambda_f} \frac{\partial \Theta_s}{\partial n} = \frac{\partial \Theta_f}{\partial n}$, на границе контакта рёбер и источника: $\frac{\partial \Theta}{\partial Z} = -\frac{\lambda_f}{\lambda_w}$. Метод решения описан в работах [1, 2].

Работа выполнена в рамках реализации проекта Российского научного фонда (соглашение № 22-79-00291).

Список литературы

1. **Шеремет М.А.** Сопряженные задачи естественной конвекции. Замкнутые области с локальными источниками тепловыделения. Берлин: Lambert Academic Publishing, 2011. 176 с.
2. **Гибанов Н.С., Шеремет М.А.** Численное исследование смешанной конвекции в канале с тепловыделяющим источником энергии и радиаторной системой. Материалы Восьмой Российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 17 – 22 октября 2022 г.): в 2 т. Т.1. М.: Издательство МЭИ, 2022. 440 с.

N.S. Gibanov, M.A. Sheremet

Tomsk State University,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 36

THE EFFECT OF CHANNEL INCLINATION ANGLE ON MIXED CONVECTION IN THE PRESENCE OF A HEAT GENERATING ELEMENT AND HEAT-DISSIPATING FINS

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

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

ПОЛУЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ ВТОРИЧНЫХ ФРАГМЕНТОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ МИКРО-ВЗРЫВНОГО РАСПАДА

Введение. Вторичное измельчение многокомпонентных капель жидкостей считается одним из наиболее актуальных направлений развития топливных технологий. Среди известных способов вторичного измельчения микро-взрывная фрагментация считается наиболее продуктивной вследствие существенно большего роста площади поверхности жидкости в единицу времени [1]. Определение условий, необходимых для образования вторичных фрагментов определенных размеров и скоростей движения, позволит достичь оптимальных режимов работы технологического оборудования.

Существующие модели микро-взрывного распада не позволяют с достаточной степенью точности прогнозировать количество и средние размеры вторичных фрагментов, по причине отсутствия адекватных экспериментальных сведений или сложностей вычислений. В настоящей работе разработана полуэмпирическая модель для прогнозирования размеров вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель.

Методика экспериментальных исследований. Методика проведения экспериментов по регистрации характеристик и последствий микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель аналогична использованной в [2]. Основное внимание уделено регистрации температуры жидкости перед микро-взрывным распадом. В качестве компонентов капель использовались вода, керосин, дизельное топливо и рапсовое масло.

Математическая модель. При проведении теоретических исследований использовалась ранее разработанная математическая модель [3], которая основана на предположении, что капля воды располагается в центре капли топлива. В качестве критерия микро-взрывной фрагментации используется достижение на границе раздела вода/топливо температуры нуклеации воды. В модели используется предположение о связи температуры нуклеации воды на границе раздела вода/топливо с режимов фрагментации (диспергирование или микро-взрыв) и средним размером вторичных фрагментов.

*Р.М. Федоренко, vfedrm@gmail.com

Результаты и обсуждения. По результатам проведенных экспериментов была установлена связь степени перегрева воды на границе раздела вода/топливо с режимами фрагментации двухжидкостных капель. Установлены диапазоны скоростей нагрева капель для двух режимов: диспергирования и микро-взрыва. В соответствии с установленными степенями перегрева воды перед микро-взрывным распадом было установлено соответствие скорости нагрева капель и средних размеров вторичных фрагментов. Полученные выражения были внедрены в математическую модель [3]. Результаты математического моделирования показали удовлетворительное соответствие экспериментальных и теоретических данных.

Заключение. По результатам обобщения полученных результатов экспериментальных исследований получено выражение для описания связи между размерами вторичных фрагментов, получаемыми при микро-взрывном распаде родительской капли, от степени перегрева воды на границе раздела вода/топливо. Полученное выражение было внедрено в ранее разработанную модель микро-взрывного распада. С применением созданного полуэмпирического подхода выполнено прогнозирование значений размеров вторичных фрагментов для наиболее перспективных топливных технологий.

Работа поддержана Российским научным фондом (проект 21-71-10008, <https://rscf.ru/project/21-71-10008/>)).

Список литературы

1. **Antonov D.V., Fedorenko R.M., Strizhak P.A.** Child droplets produced by micro-explosion and puffing of two-component droplets // Appl. Therm. Eng. 2020. V. 164. 114501.
2. **Antonov D.V., Volkov R.S., Fedorenko R.M., Strizhak P.A., Castanet G., Sazhin S.S.** Temperature measurements in a string of three closely spaced droplets before the start of puffing/micro-explosion: Experimental results and modelling // Int. J. Heat Mass Transf. 2021. V. 181. 121837.
3. **Fedorenko R.M., Antonov D.V., Strizhak P.A., Sazhin S.S.** Time evolution of composite fuel/water droplet radii before the start of puffing/micro-explosion // Int. J. Heat Mass Transf. 2022. V. 191. 122838.

R.M. Fedorenko, D.V. Antonov, P.A. Strizhak
National Research Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634050 Tomsk, Lenin Avenue, 30

SEMI-EMPIRICAL MODEL OF CHILD-DROPLETS FORMATION AS A RESULT OF MICRO-EXPLOSIVE BREAKUP

А.С. Мунгалов^{1,2}, Д.Ю. Кочкин¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, д. 1

² Новосибирский государственный университет,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, д. 1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ В МИНИКАНАЛЕ

Тонкопленочное течение под действием потока газа является эффективным методом охлаждения теплонагруженных элементов [1]. В данной системе увеличение расхода жидкости позволяет расширить диапазон отводимых тепловых потоков. Однако при определенных расходах газа и жидкости происходит переход от расслоенного режима течения к кольцевому. В этом случае часть жидкости взаимодействует с верхней стенкой канала и не участвует в отводе тепла с поверхности охлаждаемого элемента. Целью работы является экспериментальное и численное исследование перехода от расслоенного режима течения к кольцевому в миниканале.

Численное моделирование проводилось методом конечных объемов, реализованным в пакете программ Ansys Fluent в двумерной постановке. Для описания динамики межфазной границы использовался метод объема жидкости. Для детального понимания природы перехода от расслоенного режима течения к кольцевому, варьировалась геометрия входного участка, а также скорости жидкости и газа. Кроме того, осуществлялся поиск геометрии входного участка, при которой расслоенный режим течения сохраняется для широкого диапазона расходов газа и жидкости.

Для верификации разработанной численной модели на 3D принтере был напечатан рабочий участок из фотополимерной смолы, который представлял собой миниканал высотой 2 мм, шириной 30 мм. Длина канала от точки смешения до выхода составляла 60 мм. Пример режимов течения представлена на рис. 1.

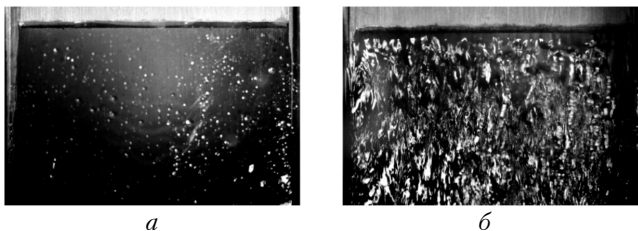


Рис. 1. Формирование капель на верхней стенке канала (а);
кольцевой режим (б)

Результат расчета расслоенного режима течения в миниканале высотой 1 мм, длиной 70 мм и углом подвода жидкости 45° приведен на рис. 2. Численный расчет показал, что вблизи смесителя образуются возмущения в жидкости, с которых происходит срыв капель. Стоит отметить, что образование неустойчивости подобного типа, характеризующейся отрывом капель, происходит по всей длине канала, а не только в области смесителя. При этом капли, взаимодействуя с верхней стенкой канала, могут коалесцировать и формировать пленку жидкости.



Рис. 2. Результаты расчета для входного участка с углом подвода жидкости 15° . Скорость газа 25 м/с, скорость жидкости 1 м/с

Работа поддержана РФФ (грант № 19-19-00695 П).

Список литературы

1. Kabov O.A., Zaitsev D.V., Cheverda V.V., Bar-Cohen A. Evaporation and flow dynamics of thin, shear-driven liquid films in microgap channels // Exp. Therm. Fluid Sci. 2011. V. 35.

A.S. Mungalov^{1,2}, D.Y. Kochkin¹

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics,
1 Acad. Lavrentiev ave., Novosibirsk, Russia

² Novosibirsk State University,
1, Pirogova str., Novosibirsk, Russia

THE EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF TWO-PHASE FLOW IN MINICHANNEL

*И.П. Малахов¹, В.С. Сердюков¹, А.И. Сафонов¹, А.А. Родионов¹,
С.В. Старинский¹, А.С. Суртаев¹*

¹ Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, д. 1

БИФИЛЬНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ ИЗ КРЕМНИЯ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА И ПОВЫШЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК ПРИ КИПЕНИИ

Кипение жидкости является одним из наиболее эффективных способов теплоотвода и широко используется в различных областях промышленности. Важной задачей является повышение функциональности и надежности работы различных устройств микроэлектроники, для чего необходимо поддерживать температуру их элементов постоянной на заданном уровне. Как правило для интенсификации теплообмена и повышения критических тепловых потоков (КТП) при кипении применяются различные методы модификации теплообменной поверхности. Одним из наиболее перспективных и обсуждаемых подходов является использование т.н. бифильных поверхностей, представляющих собой гидрофобные участки на гидрофильном основании, которые позволяют одновременно добиться снижения температурного напора закипания, а также повышения коэффициента теплоотдачи и критического теплового потока. Тем не менее актуальным вопросом остается поиск наиболее технологичных методов создания бифильных поверхностей, а также их оптимальных конфигураций.

В настоящей работе было проведено экспериментальное исследование эволюции исследования теплообмена и развития кризиса кипения воды на бифильной поверхности, созданной на кремниевой подложке с помощью методов химического осаждения (HWCVD) и лазерной абляции. Для анализа интенсивности теплообмена использовалась высокоскоростная термографическая съемка нестационарного поля температур нагревателя, а также высокоскоростная видеосъемка процесса с боковой стороны нагревательной поверхности.

С использованием данных высокоскоростной визуализации было показано, что на бифильной поверхности режим развитого кипения начинается при существенно более низких тепловых потоках по сравнению с базовой поверхностью ($q = 21$ кВт/м² и $q > 90$ кВт/м², соответственно). При этом существенно повышается как частота отрыва пузырей, так и плотность активных центров в широком диапазоне тепловых потоков. На рис. 1 представлены кривые кипения для базовой и бифильной поверхностей. На осно-

вании данных ИК термографии было показано, что для бифильной поверхности наблюдается значительное снижение температуры начала кипения, а также снижение интегральной температуры в среднем на 5-7 К по сравнению с немодифицированным кремнием в режиме развитого пузырькового кипения, что свидетельствует о повышении коэффициента теплоотдачи до 60 %. Полученные кривые также показывают, что при кипении на бифильной поверхности величина КТП (1514 кВт/м²) на 76 % превышает величину КТП для базовой поверхности (858 кВт/м²). Кроме того, эксперименты показали повторяемость кривых кипения в различных сериях опытов, что говорит об устойчивости бифильной поверхности и перспективности использования вышеуказанных методов управления свойствами смачивания для модификации кремния, являющегося основным материалом современной микро/нанoeлектроники.

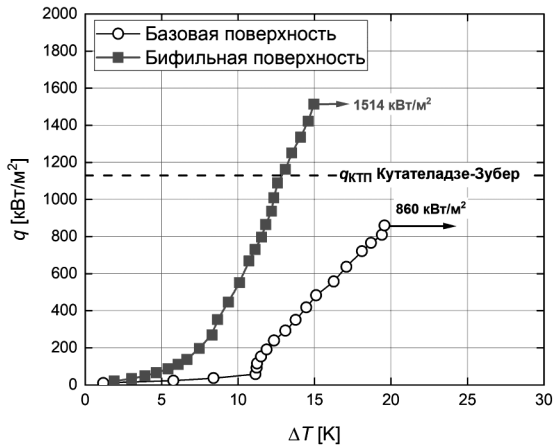


Рис. 1. Кривые кипения воды на немодифицированном кремнии и бифильной поверхности

Исследование выполнено за счёт гранта Российского Научного Фонда (проект № 18-79-10119n).

*I.P. Malakhov¹, V.S. Serdyukov¹, A.I. Safonov¹, A.A. Rodionov¹,
S.V. Starinski¹, A.S. Surtayev¹*

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS,
Russia, 630090, Novosibirsk, Lavrentiev ave. 1

BIPHILIC SILICON SURFACES TO ENHANCE HEAT TRANSFER AND INCREASE CRITICAL HEAT FLUXES DURING BOILING

СЕКЦИЯ 6

ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ ТЕПЛО-И МАССООБМЕНА

А.В. Овсянник¹, В.П. Ключинский¹

¹ Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, 246746, Республика Беларусь, г. Гомель, пр. Октября, д. 48*

ТРИГЕНЕРАЦИОННАЯ И ПОЛИГЕНЕРАЦИОННАЯ УТИЛИЗАЦИЯ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ

Большое количество предприятий в различных отраслях промышленности одновременно нуждаются в электрической энергии, теплоте, холоде и углекислоте. Для удовлетворения необходимых потребностей в [1] разработана схема полигенерационной установки на основе турбин на низкокипящих рабочих телах. Разработанная схемы полигенерации позволяет вырабатывать не только электричество, теплоту и холод, но и дополнительно производить углекислоту в жидком и газообразном состоянии, которая в свою очередь изымается из продуктов сгорания топлива (вторичных энергетических ресурсов). Полученная углекислота может быть использована для широкого спектра промышленных предприятий и в качестве одного из компонентов авиационного топлива: предприятия химической, целлюлозно-бумажной, горнодобывающей, фармацевтической и др. промышленности. А также выступать в качестве рабочего тела для турбоустановок на основе низкокипящих рабочих тел [2]. Полезное использование, полученной из продуктов сгорания, углекислоты позволяет снизить выбросы диоксида углерода в атмосферу.

Проведен технико-экономический анализ следующих способов (вариантов) утилизации вторичных энергетических ресурсов:

вариант 1 – когенерационный (тепловая энергия производится в газодляном теплообменном аппарате; электрическая – в турбоустановке на водяном паре);

вариант 2 – тригенерационный (тепловая энергия производится в газодляном теплообменном аппарате; электрическая – в турбоустановке, работающей на фреоне R410A; холод – в парокомпрессионной холодильной установке, использующей в качестве рабочего тела фреон R410A);

вариант 3 – полигенерационный (тепловая энергия производится в газодляном теплообменном аппарате; электрическая – в турбоустановке работающей на диоксиде углерода; холод и диоксид углерода – в установке по совместному производству холода и углекислоты [3]).

*А.В. Овсянник, av.ovsyannik@mail.ru

В качестве источника энергии выступали вторичные энергетические ресурсы в виде древесной щепы. Температура рабочего тела перед турбиной составила 250 °С. Результаты технико-экономического анализа представлены в таблице.

Таблица

Результаты технико-экономического анализа способов утилизации вторичных энергетических ресурсов

Показатель	Варианты		
	№ 1	№ 2	№ 3
Отпуск электрической энергии, МВт·ч/год	11318	13701	15115
Отпуск тепловой энергии МВт·ч/год	7372	7372	7372
Отпуск холод (+4 °С) МВт·ч/год	–	1489	1489
Отпуск холод (-18 °С) МВт·ч/год	–	2234	2234
Отпуск жидкой CO ₂ , т/год	–	–	1415
Отпуск газообр. CO ₂ , т/год	–	–	2830
Σ Стоимость установки, тыс. бел. руб	5994	6638	8787
Эксплуатационные расходы, тыс. бел. руб/год	539	597	791
Затраты на топливо, тыс. бел. руб/год	1625	1625	1625
Статический срок окупаемости, лет	4,9	3,6	2,1
Внутренняя норма доходности, %	19,7	27,5	47,1
Динамический срок окупаемости (p = 18 %), лет	13,3	6,0	3,9

Анализ полученных результатов свидетельствует что наиболее экономически привлекательным является полигенерационный способ утилизации вторичных энергетических ресурсов (вариант 3), который позволяет снизить выброс более четырех тысяч тонн в год диоксида углерода в окружающую среду.

Список литературы

1. **Ovsyannik A.V.** Trigenation units on carbon dioxide with two-time overheating with installation of turbo detainer and recovery boiler / A.V. Ovsyannik, P.A. Kovalchuk, A.I. Arshukov, V.P. Kliuchinski // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1683. № 042010.
2. **Овсянник А.В.** Турбодетандерные установки на низкокипящих рабочих телах / А.В. Овсянник, В.П. Ключинский // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2021. № 1 (64). С. 65 – 77.
3. **Овсянник А.В.** Термодинамическая оптимизация установки для производства углекислоты как элемента тригенерационной турбоустановки на органическом цикле Ренкина / А.В. Овсянник, В.П. Ключинский // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. 2021. № 1. С. 61 – 68.

A.V. Ovsyannik¹, V.P. Kliuchinski¹

¹ Sukhoi State Technical University of Gomel,
Republic of Belarus, 246746 Gomel, Octiabria Ave., 48

TRIGENERATION AND POLYGENERATION UTILIZATION OF SECONDARY ENERGY RESOURCES

И.А. Попов¹, С.Ч. Арсланбаев²

¹Казанский государственный аграрный университет
420015, Российская Федерация, Казань, ул. К.Маркса, 65 *

²Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ
420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НОВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Теплопроводность полимерных композиционных материалов (ПКМ) играют решающую роль при оптимизации технологических режимов их получения и проектировании инженерных систем, где важны температура и тепловое напряжение. На теплопроводность композиционных материалов большое влияние оказывают температура, химический состав, количество и размеры армирующего наполнителя, пористость и направление теплового потока.

В качестве объекта исследования выбирались ПКМ на основе различных связующих и различным тканей. Исследованы ПКМ на основе армирующих элементов в виде препрегов из углеродной ткани саржевого переплетения из волокна UMT40-3K-EP (образец № 1) и из углеродной ленты из углеродного волокна UMT49-12K-EP (№ 2) с эпоксидным связующим отвержденного ароматическим аминным отвердителем; ПКМ-термопласты на основе армирующих элементов в виде препрегов из углеродной ткани из углеродного волокна UMT-49 со связующим из полиэфирэфиркетона РЕЕК (№3) и из углеродной ткани саржевого плетения из углеродного волокна Tenax®-E HTA40 3K со связующим РЕЕК-4-40-HTA40 (№ 4); ПКМ-реактопласты на основе армирующих элементов в виде препрегов из арамидной ткани из волокна РУСАР-С600 саржевого плетения со связующим на основе эпоксидной смолы Т-26 (№5) и из углеродной ткани из углеродного волокна UMT-49 саржевого плетения также со связующим на основе эпоксидной смолы Т-26 (№6). Структура ПКМ оценивалась на оптическом микроскопах Leica M80 (рис. 1).

Для определения коэффициентов теплопроводности использовался измеритель теплового потока, например, HFM 446 Lambda Small (Netzsch, Германия). Коэффициент теплопроводности ПКМ оценивался нормально к плоскости пластины (армирования).

Результаты определения температурных зависимостей коэффициентов теплопроводности λ (Вт/(м·К)) в диапазоне $-20 \dots 80$ °С для исследованных ПКМ представлены в таблице.

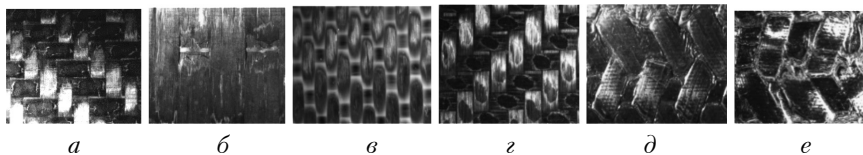


Рис. 1. Структуры ПКМ с различным армированием:
a – образец №1; *б* – №2; *в* – №3; *г* – №4; *д* – № 5; *е* – № 6

Таблица

№ образца	Температурная зависимость для коэффициентов теплопроводности
1	$\lambda = 0,43297 + 0,00096534 \cdot t + 8,1659 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 - 7,29628 \cdot 10^{-8} \cdot t^3$
2	$\lambda = 0,36841 + 0,00121 \cdot t + 1,47144 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 - 2,86053273 \cdot 10^{-9} \cdot t^3$
3	$\lambda = 0,44764 + 0,00144 \cdot t + 2,74792 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 - 3,40043 \cdot 10^{-8} \cdot t^3$
4	$\lambda = 0,29665 + 0,00105 \cdot t - 1,77706 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 1,52788 \cdot 10^{-7} \cdot t^3$
5	$\lambda = 0,1442 + 2,16872 \cdot 10^{-4} \cdot t - 5,13871 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 - 5,82999 \cdot 10^{-8} \cdot t^3$
6	$\lambda = 0,31902 + 8,97684 \cdot 10^{-5} \cdot t - 3,30384 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 - 1,56652 \cdot 10^{-7} \cdot t^3$

Примечание: *t* – средняя температура образца, °С.

Полученные результаты могут быть использованы для расчета и проектирования систем и установок с использованием конструкционных углепластиков, а также для моделирования технологических процессов производства. На основе полученных данных может быть сформирована база данных РФ по коэффициентам теплопроводности и удельной теплоемкости ПКМ. Результаты также позволяют проводить верификацию численных моделей теплопроводности исследованного материала с учетом его структуры.

Исследование проведено в рамках соглашения с Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

I.A. Popov¹, S.Ch. Arslanbaev²

¹ Kazan State Agrarian University

65 K.Marx Str., Kazan, 420015, Russian Federation

² Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI

10 K.Marx str., Kazan, 420111, Russian Federation

THERMAL CONDUCTIVITY STUDY OF NEW COMPOSITE CARBON FIBER MATERIALS

*В.А. Шурутов, В.А. Следнев, Л.В. Плотников,
Д.Н. Красильников, Д.А. Давыдов*

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина»
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19*

ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕРМОМЕХАНИКИ ПОТОКОВ ВО ВПУСКНОЙ СИСТЕМЕ ДВС ПОСРЕДСТВОМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Поршневые двигатели внутреннего сгорания (ДВС) занимают лидирующие позиции среди тепловых двигателей в малой энергетике и наземном транспорте. От эффективности рабочего цикла ДВС зависят эксплуатационные показатели конечного продукта и его конкурентоспособность. Поэтому, совершенствование процессов остается актуальной задачей в развитии поршневого двигателестроения. Одним из важнейших направлений такого совершенствования являются процессы газообмена [1].

В данном исследовании проводилась верификация результатов математического моделирования газодинамики и теплоотдачи стационарных потоков во впускной системе и цилиндре поршневого ДВС посредством экспериментальных данных.

На первом этапе проводилось качественное сравнение поля скоростей в цилиндре двигателя (рис. 1). Моделирование выполнялось в специализированном программном комплексе Fidesys (Россия). Экспериментальные термограммы структуры потока в цилиндре получены с помощью метода тепловизирующей съемки [2]. Из рис. 1 видно, что наблюдается качественное сходство структуры потока в цилиндре двигателя.

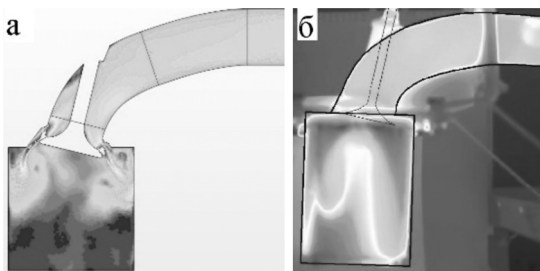


Рис. 1. Расчетное поле скоростей (а) и экспериментальная термограмма (б) структуры потока в цилиндре при начальной скорости $w = 50$ м/с

*Л.В. Плотников, plotnikovlv@mail.ru

На втором этапе осуществлялось сравнение интенсивности теплоотдачи во впускной системе поршневого ДВС (рис 2). Экспериментальное определение коэффициента теплоотдачи выполнялось тепловым датчиком посредством термоанемометра постоянной температуры [3]. Из рис. 2 видно, что отличия в значениях коэффициента теплоотдачи, полученные в результате моделирования и на экспериментальной установке, отличаются на 5-25 %.

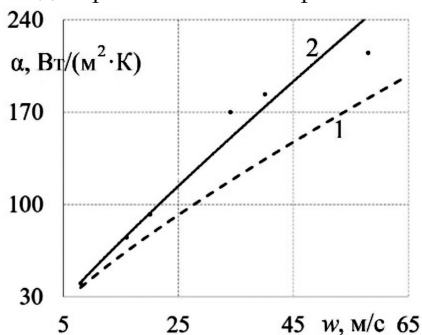


Рис. 2. Зависимости коэффициента теплоотдачи α от скорости потока воздуха w во впускной системе:
1 – моделирование; 2 – эксперимент

Таким образом, установлено качественное соответствие расчетных и экспериментальных данных. При этом необходима дополнительная настройка математической модели по определению уровня теплообмена на впуске.

Работа выполнена при поддержке РФФ в рамках научного проекта 23-29-00022.

Список литературы

1. **Плотников Л.В.** Нестационарные тепломеханические процессы в системах газообмена поршневых двигателей с турбонаддувом. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2020. 204 с.
2. **Жилкин Б.П., Зайков Н.С., Кисельников А.Ю., Худяков П.Ю., Алексеев С.Г.** Применение тепловизионного метода для обнаружения очагов пламенного горения // Пожаровзрывобезопасность. 2012. Т. 21. № 4. С. 38 – 40.
3. **Плотников Л.В.** Особенности газодинамики и теплообмена стационарных и пульсирующих потоков во впускной системе поршневого двигателя // ИФЖ. 2023. Т. 96, № 1. С. 246 – 254.

*V.A. Shurupov, V.A. Slednev, L.V. Plotnikov, D.N. Krasilnikov,
D.A. Davydov*

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Russia 620002 Ekaterinburg, Mira, 19

VERIFICATION OF THE SIMULATION RESULTS OF FLOWS THERMOMECHANICS IN THE INLET SYSTEM OF ICE USING EXPERIMENTAL DATA

В.А. Медведев, Л.Е. Осипов, Л.В. Плотников, М.Д. Смирных

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19*

ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ТЕПЛООБМЕНА В ВЕРТИКАЛЬНОМ КОНИЧЕСКОМ ДИФFUЗОРЕ

Вертикальные конические диффузоры активно применяются в различных технических устройствах и технологических процессах [1]. Совершенствование газодинамики и термомеханики потоков позволит повысить эффективность, надежность и производительность изделий с такими диффузорами.

Основная цель данного исследования состояла в получении экспериментальных данных о газодинамических условиях теплообмена в коническом диффузоре при подаче воздуха через сопловые трубки.

На рис. 1 показана схема исследуемого диффузора и пример структуры потока в нем. Термограммы были получены с помощью метода тепловизирующей съемки [2]. Исследования проводились в стационарном режиме течения для начальной (характерной, высота 100 мм) скорости $w = 2 - 12$ м/с.

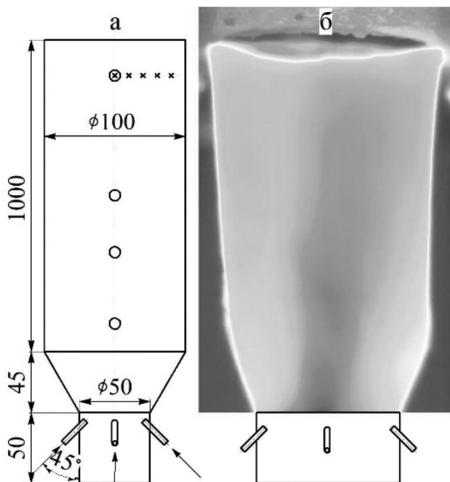


Рис. 1. Схема подачи воздуха в вертикальный диффузора (а) и термограмма структуры потока для характерной скорости $w = 6,3$ м/с (б)

* Л.В. Плотников, plotnikovlv@mail.ru

На рис. 2 показана эволюция полей скоростей w и степени турбулентности Tu по высоте и диаметру диффузора. Данные получены с помощью метода термоанемометрирования [3]. Установлено, имеет место падение скорости по высоте диффузора, а значения Tu изменяются от 0,1 до 0,5.

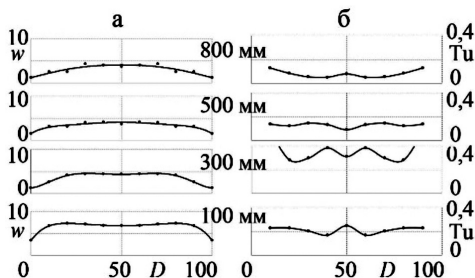


Рис. 2. Распределение полей скоростей (а) и степени турбулентности (б) потока по высоте и диаметру диффузора для характерной скорости $w = 6,3$ м/с

Таким образом, получены экспериментальные данные о газодинамических характеристиках потоков вертикально диффузоре, которые будут полезны для оценки тепло- и массообмена для различных технических устройств и технологических процессов.

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. **Japikse D., Baines N.C.** Diffuser Design Technology. Norwich: Concepts ETI, 1998. 524 p.
2. **Жилкин Б.П., Зайков Н.С., Кисельников А.Ю., Худяков П.Ю., Алексеев С.Г.** Применение тепловизионного метода для обнаружения очагов пламенного горения // Пожаровзрывобезопасность. 2012. Т. 21. № 4. С. 38 — 40.
3. **Плотников Л.В.** Особенности газодинамики и теплообмена стационарных и пульсирующих потоков во впускной системе поршневого двигателя // ИФЖ. 2023. Т. 96, № 1. С. 246 — 254.

V.A. Medvedev, L.E. Osipov, L.V. Plotnikov, M.D. Smirnykh

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin,
Russia 620002 Ekaterinburg, Mira, 19

GAS DYNAMIC HEAT TRANSFER CONDITIONS IN A VERTICAL CONICAL DIFFUSER

К.Т. Чан, А.С. Дмитриев

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14*

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАГРЕВА И ИСПАРЕНИЯ НАНОЖИДКОСТЕЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В последнее время интерес к исследованиям наножидкостей как новому классу теплоносителей в энергетике, в том числе солнечной теплоэнергетике, быстро вырос. Так как наноматериалы обладают улучшенными теплофизическими свойствами и совершенно новыми механизмами взаимодействия с тепловым излучением по сравнению с объемными материалами, они открывают возможности эффективного преобразования солнечного излучения в пар [1-2].

В данной работе исследованы теоретически и экспериментально процессы нагрева и испарения различных наножидкостей на базе дистиллированной воды. Разработаны математические модели нагрева наножидкостей, состоящих из сферических наночастиц. В рамках разработанных моделей проведены анализ и выбор подходящих корреляций, описывающих теплофизические свойства таких наножидкостей. На основе разработанных моделей были проведены теоретические исследования распределения температурного поля наножидкостей в зависимости от различных параметров, включая концентрацию и размер наночастиц, интенсивность падающего теплового излучения и другие. Теоретически оценено время, за которое температура поверхности наножидкости достигает температуры насыщения. Показано, что среди исследуемых наножидкостей самую высокую эффективность демонстрирует наножидкость из наночастиц алмаза.

Эксперименты по нагреву и испарению наножидкостей были проведены по методике, изложенной в работе [3]. Полученные данные по измерению температуры наножидкостей в точке, находящейся на расстоянии 8 мм от поверхности, соответствуют теоретическим расчетам. Показано, что по мере увеличения концентрации наночастиц темп изменения температуры в данной точке замедляется. Это объясняется тем, что чем выше концентрация наночастиц, тем больше эффективный коэффициент экстинкции (ЭКЭ) наножидкостей, что приводит к эффективному поглощению теплового излучения в

*А.С. Дмитриев, asdmitriev@mail.ru

верхних слоях наножидкостей. Согласно расчетным данным по оптическим свойствам наножидкостей при повышении концентрации наночастиц алмаза средним размером 50 нм от 0,1 до 0,5% ЭКЭ наножидкости увеличивается в 5 раз, а при повышении до 1% – в 10 раз. При этом температура поверхности наножидкостей с большей концентрацией быстрее растет по времени, что приводит к более эффективному испарению. Данный факт подтверждается экспериментальными данными по измерению интенсивности испарения наножидкости из наночастиц алмаза при ее облучении инфракрасным излучением в диапазоне длин волн от 1,85 до 8,9 мкм (рис. 1).

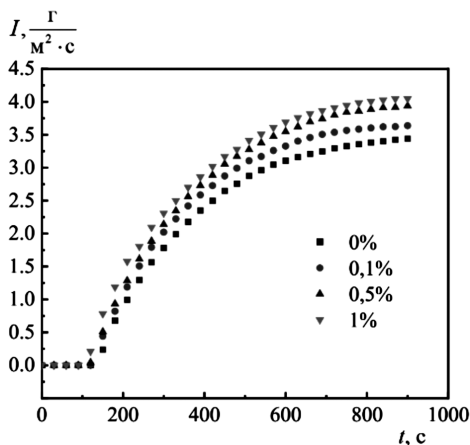


Рис. 1. Зависимость интенсивности испарения наножидкости (вода-наноалмаз) по времени при разных концентрациях наночастиц

Список литературы

1. Дмитриев А.С., Клименко А.В. Преобразование солнечного излучения в пар – новые возможности на основе наноматериалов (обзор). ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА, 2020, № 2. С. 1 – 16. DOI: 10.1134/S0040363620020010
2. Дмитриев А.С. Введение в нанотеплофизику. Изд-во: БИНОМ. 2015. 792 с.
3. LI, Xiuqiang et al. Measuring conversion efficiency of solar vapor generation. Joule, 2019, 3.8: 1798-1803.

Q.T. Tran, A.S. Dmitriev

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,
Russia, 111250 Moscow, Krasnokazarmennaya, 14

**MATHEMATICAL MODELS AND EXPERIMENTAL
INVESTIGATION OF PROCESSES OF HEATING
AND EVAPORATION OF NANOFUIDS
UNDER SOLAR RADIATION**

*А.Д. Рожков^{1,2}*¹ Национальный исследовательский институт «МЭИ»,
112250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14² ОАО «Всероссийский теплотехнический институт»,
115280, г. Москва, ул. Автозаводская, д. 14*

ВЛИЯНИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕПУСКА ВОЗДУХА И МЕСТА ОТБОРА ПЕРЕПУСКАЕМОГО ВОЗДУХА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА ГТУ

Широкое применение на тепловых электрических станциях (ТЭС) Российской Федерации нашли газотурбинные установки (ГТУ) всех ведущих мировых производителей. Некоторые из этих установок имеют отличительную особенность конструкции, а именно, систему перепуска воздуха с его выхода на всас. Применение перепуска воздуха позволяет сохранить параметры воздуха на выходе из компрессора приемлемыми для низкоэмиссионного процесса горения в камере сгорания (КС), а также поддерживать температуру газов на выходе из ГТУ, достаточную для выработки необходимых параметров пара в котле-утилизаторе (КУ), при работе ГТУ в составе паро-газовых установок (ПГУ). Кроме того, наличие системы перепуска воздуха способствует более глубокому разгрузению, что является преимуществом таких ГТУ [1]. Несмотря на это явное преимущество, влияние системы перепуска воздуха на характеристики и теплообмен в компрессоре является неисследованным вопросом.

Для изучения влияния системы перепуска воздуха была построена модель компрессора по термогазодинамическим расчётам, подробно описанным в [2].

Для построения модели был проведен расчёт основных геометрических характеристик компрессора и распределение напоров по каждой ступени компрессора отдельно. Полученные геометрические и напорные характеристики позволили провести поступенчатый термогазодинамический расчёт. Исползованная при расчёте методика является универсальной и применима для всех типов ГТУ. При проведении расчёта соблюдались критерии надёжности для осевых компрессоров ГТУ.

Величина расхода перепускаемого воздуха зависит от электрической мощности ГТУ и задавалась исходя из опыта эксплуатации ГТУ с имеющейся подобной системой (не более 10% от значения расхода наружного воздуха). При отборе воздуха из-за последней ступени изоэнтروпический КПД компрессора ГТУ снизился на ~1% (с 85,6 до 84,7 %). При этом КПД ступеней снижался также приблизительно на 1 %. Снижение КПД компрессора при

*А.Д. Рожков, ADRozhkov@vti.ru

повышении температуры воздуха на входе в него также подтверждается большим количеством экспериментальных данных и накопленным опытом работы с ГТУ подобного типа.

На значения степени повышения давления влияния отбор не произвёл, и значение для всего компрессора составило $\sim 8,0$ о.е. Снижение давления за сопловой лопаткой последней ступени компрессора составило всего не-сколько кПа (не более 2 кПа).

Перенос камеры отбора воздуха от последней ступени компрессора за сопловую лопатку предпоследней снижает давление за сопловой лопаткой на 3-4 кПа и приводит к снижению степени повышения давления до 7,9. Вместе с параметрами, характеризующими давления, снижается и другой важнейший термодинамический параметр – температура воздуха. Это относится и к температуре за последней ступенью, которая снижается незначительно, так и к величине нагрева за счёт перепуска воздуха. Если при отборе из-за последней ступени величина данного нагрева составляет $19\text{ }^{\circ}\text{C}$, то при отборе из-за предпоследней ступени он снижается до $16\text{ }^{\circ}\text{C}$. Перенос камеры отбора воздуха дальше от выходного патрубка приводит к стремительному снижению температуры нагрева приточного воздуха (за 16-й ступенью нагрев составляет $13\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Значительное снижение КПД и степени повышения давления наблюдаются в случае, если камера отбора находится за одной из промежуточных ступеней, а не за последней. Установка камеры отбора перепускаемого воздуха за последней ступени позволяет нагревать поступающий в компрессор воздух на величину, обеспечивающую его надёжную и безопасную работу без ухудшения аэродинамических характеристик компрессора. Это является ещё одним недостатком камеры отбора, находящейся за промежуточной ступенью, наравне с упомянутыми ранее.

Список литературы

1. **Ольховский Г.Г.** Тепловые испытания мощных энергетических ГТУ. Издательский дом «Фолиум», 2015. С. 15 – 30.

2. **Белоусов А.Н., Мусаткин Н.Ф., Радько В.М.** Теория и расчёт авиационных лопаточных машин. Самара: ФГУП «Изд-во «Сам. дом печати», 2003.

A.D. Rozhkov^{1,2}

¹ National Research University «MPEI»,
Russia, 111116 Moscow, Krasnokazarmennaya, 14

² All-Russia Thermal Engineering Institute,
Russia 115280 Moscow, Avtozavodskaya, 14

THE EFFECT OF THE BYPASS SYSTEM AND BYPASS AIR SAMPLING ON THE PERFORMANCE OF THE GAS TURBINE AXIAL COMPRESSOR

Д.К. Попова^{1,2*}, Н.Н. Кортиков¹

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

² АО “ОДК-Климов”, 197375, г. Санкт-Петербург, ул. Академика Харитона, д. 8*

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООБМЕНА НА ПОВЕРХНОСТИ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИНОЙ СТУПЕНИ

Постоянный рост температуры газа на входе в турбину приводит к необходимости обеспечения работоспособности лопаточного аппарата газотурбинного двигателя (ГТД), подверженного нестационарному воздействию высоких температур газа [1]. Нестационарный характер потока газа в турбомашине обусловлен газодинамическим взаимодействием соседних неподвижных и вращающихся решеток профилей (статор-ротор взаимодействием).

Основными источниками нестационарности являются: дозвуковое потенциальное взаимодействие, взаимодействие ударных волн и следа, а также температурная неравномерность («температурные пятна») на выходе камеры сгорания ГТД [2]. В межлопаточных каналах ротора турбины поток, имеющий начальную температурную неоднородность, происходит сепарация: «горячие» слои, как правило, перемещаются к поверхности корыта лопатки, а «холодные» – к поверхности спинки. В результате осредненная по времени температура корыта лопатки выше температуры спинки [3].

Целью данной работы является разработка численной модели для расчета нестационарного теплового потока на поверхности рабочих лопаток с последующим расчетом значения числа Нуссельта Nu (осредненного во времени) на спинке и корыте рабочей лопатки при изменении положения температурной неоднородности на входе в турбинную ступень (*clocking effect*).

Расчет газодинамических процессов в турбинной ступени проводился в программном комплексе *STARCCM+* в трехмерной постановке. Решалась система уравнений Навье-Стокса и энергии, осредненных по Рейнольдсу, описывающая нестационарное течение совершенного сжимаемого газа по методу скользящих сеток.

На рис. 1 дано сравнение результатов расчета (кривая 1) с опытными данными [4] (кривая 2), которое показывает их удовлетворительное совпадение (неопределенность не превышает 10 %). Здесь отмечается значительный рост амплитуды колебаний плотности теплового потока на поверхности рабочей лопатки (до 30 %) при значении входной неравномерности $OTDT$ [4], равной 14 % и параметре вращения [1] $Su = 0,12$. На рис. 2 представлено

* Д.К. Попова, daria_well96@mail.ru

распределение расчетных и опытных данных для осредненного по времени теплообмена по обводу рабочей лопатки при числах Рейнольдса $Re = 3,4 \cdot 10^5$ и Струхала $Sh = 1,05$. Отмечается их расхождение для корытной части рабочей лопатки, которое достигает 15 %.

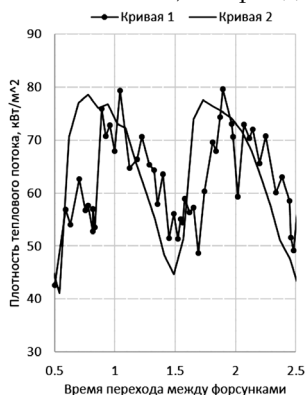


Рис.1. Колебание плотности теплового потока на поверхности рабочей лопатки (расчет и эксперимент [4])

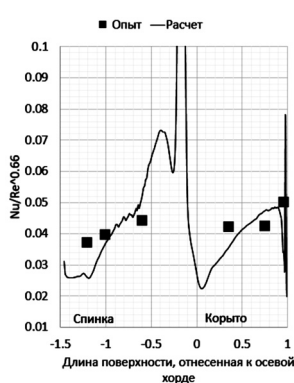


Рис.2. Теплообмен на поверхности рабочей лопатки (форсунка напротив входной кромки сопловой лопатки)

Список литературы

1. Теплопередача в охлаждаемых деталях газотурбинных двигателей / В.И. Локай, М.Н. Бодунов, В.В. Жуйков, А.В. Щукин. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Машиностроение. 1993. 288 с.
2. **Августиневич В.Г., Шмотин Ю.Н.** Численное моделирование нестационарных явлений в газотурбинных двигателях. М.: Машиностроение, 2005. 536 с.
3. **Kortikov N.** Simulation of the joint effect of rotor-stator interaction and circumferential temperature unevenness on losses in the turbine stage. MATEC Web of Conference. 2018. 245. 04006. (<https://doi.org/10.1051/mateconf/201824506008> EECSE-2018)
4. The influence of inlet temperature distortion on rotor heat transfer in a transonic turbine/ Shang T., Guenette G.R., Epstein A.H., Saxer A.P. 31st AIAA/ASME/SAE/ASEE. Joint Propulsion Conference and Exhibit. 1995. AIAA 95-304. 11 p.

D.K. Popova^{1,2}, N.N. Kortikov¹

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Russia 195251 St. Petersburg, Polytechnicheskaya, 29

²JSC "UEC – Klimov",

Russia 197375 St.Petersburg, Acad. Chariton, 8

SIMULATION OF UNSTEADY HEAT TRANSFER ON THE SURFACE OF TURBINE STAGE BLADES

М.М. Замалеев¹, А.В. Абрамов¹, Ю.Р. Абайдуллина¹, И.И. Киселев¹

¹ Ульяновский государственный технический университет,
432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГОРОДСКИХ ТЭЦ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ТКО ДО 2030 ГОДА

В данной работе обсуждается проблема возможности использования городских ТЭЦ для переработки ТКО до 2030 года, основной которой является использование парового экструдера. Комбинирование тепловой и электрической энергии, а также продукции и услуг для городского хозяйства рассматриваться с точки зрения повышения энергетической эффективности самой ТЭЦ.

На большинстве городских ТЭЦ имеются значительные резервы для повышения эффективности, связанные с использованием энергетического потенциала ТЭЦ в городской инженерной инфраструктуре. Энергоэффективное функционирование городских ТЭЦ в составе энерготехнологических комплексов рассматривался отечественными учеными задолго до появления оптового рынка электроэнергии и мощности. Повышение эффективности и инвестиционной привлекательности теплофикационных систем возможно за счет расширения функционала ТЭЦ, в частности, за счет разработки технических и технологических решений, направленных на эффективную термическую переработку коммунальных и производственных отходов методом экструзии.

Экструзия это процесс, который заключается в механическом продавлении расплавленного полимера через калибрующее отверстие с соответствующим готовому изделию профилем. В процессе переработки пластиковых отходов работа на экструдере выполняется непрерывно, что позволяет обеспечить очень высокий уровень производительности, легкую автоматизацию процессов, экономичность и высокое качество продукции.

В данной работе представлен способ термической переработки пластика на ТЭЦ за счёт значительных резервов пара производственного и отопительного отбора, использование которого позволяет повысить тепловую экономичность тепловой электроэнергии за счет увеличения выработки электроэнергии на тепловом потреблении. По мнению авторов, существенно повысить энергетическую эффективность позволяет запатентованное решение, представленное на (рис. 1), (патент РФ № 193148) [1].

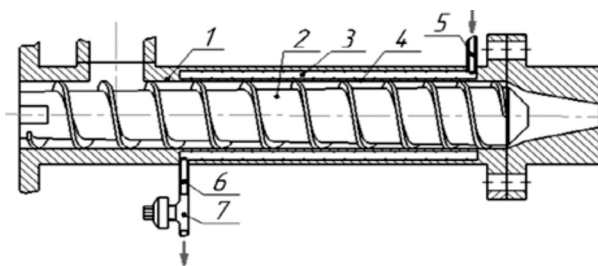


Рис. 1. Узел плавления установки по переработке полиэтилена и полипропилена:
 1 – корпус установки; 2 – шнек; 3 – нагреватель, выполненный в виде полого цилиндра; 4 – зона плавления; 5 – патрубок подвода пара; 6 – патрубок отвода конденсата; 7 – конденсатоотводчик

Особенностью предоставленного решения является использование пара отопительного или производственного отбора с температурами 100–250 °С в качестве греющей среды в экструдерах, размещаемых на городских ТЭЦ или в непосредственной близости от них. В зависимости от температуры плавления отходов пластмасс может применяться как пар отопительного, так и пар производственного отбора.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Правительства Российской Федерации (075-15-2021-584).

Список литературы

1. Патент 193148. Узел плавления установки по переработке полиэтилена и полипропилена / М.М. Замалеев, В.И. Шарапов, А.В. Абрамов // Бюллетень изобретений. 2019. № 20.

М.М. Zamaleev¹, A.V. Abramov¹, Abaydullina Y.R.¹, Kiselev I.I.¹

Ulyanovsk State Technical University,
 Russia, 432027, Ulyanovsk, st. Severny Venets, 32

POSSIBILITIES OF USING URBAN THERMAL POWER PLANTS FOR THE PROCESSING OF MSW UNTIL 2030

*К.В. Кочнев*¹

¹ Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет),
125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4*

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА ПО СПЕКАНИЮ СИМУЛЯТОРА ЛУННОГО РЕГОЛИТА В ЗЕМНЫХ УСЛОВИЯХ

Описан процесс подготовки серии экспериментов по спеканию симулятора лунного реголита в земных условиях и предоставлены промежуточные данные. Спекание – это процесс, в котором соединение разнородных компонентов происходит за счет плавления и последующего отверждения одного из компонентов, выступающего в роли связующего. Конечная цель исследования – разработка достоверной математической модели процессов теплообмена, происходящих в слое лунного реголита в процессе его нагрева концентрированным солнечным излучением. Указанная математическая модель необходима для формирования технических требований к автоматическому лунному аппарату, задачей которого будет отработка технологии переработки реголита в конструкционный материал.

Собраны данные о химическом составе и свойствах лунного реголита, определены условия, в которых будет происходить процесс спекания на поверхности Луны. По собранным данным производится математическое моделирование процесса.

Теоретические расчеты включают многие допущения, которые влияют на достоверность результатов. Поэтому, для промежуточной проверки, было решено создать прототип наземной экспериментальной установки. Для того, чтобы сравнение данных, полученных расчетным и экспериментальным путем, было корректным, в мат. модели заданы земные условия. По этой же причине в мат модели учитываются свойства симулятора лунного реголита.

Также описан процесс создания прототипа экспериментальной установки, которая должна обеспечить проведение эксперимента по спеканию симулятора лунного реголита концентрированным солнечным светом в земных условиях.

Работа была выполнена в рамках гранта РФФИ № 20-08-01174 А.

* К.В. Кочнев, kochnevkirillvl@gmail.com

Список литературы

1. **Кочнев К.В.** Моделирование теплообмена в симуляторе лунного реголита. Постановка задачи / К.В. Кочнев, А.В. Ненарокомов // Тепловые процессы в технике. 2021. Т. 13. №6. С. 242 – 252.

2. **Кудрин О.И.** Солнечные высокотемпературные космические энергодвигательные установки / Под ред. В.П. Белякова. М.: Машиностроение, 1987. 248 с.

*K. V. Kochnev*¹

¹ Moscow Aviation Institute (National Research University),
Moscow, 125993, Volokolamskoe highway, 4

STATEMENT OF THE EXPERIMENT ON SINTERING THE SIMULATOR OF THE LUNAR REGOLITH IN TERRESTRIAL CONDITIONS

И.В. Деревич, Д.И. Матюхина

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
(исследовательский университет),
105005, г. Москва, 2-ая Бауманская, д. 5

КОРРЕКТНОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О ПРОГРЕВЕ КОМПОЗИТНОЙ КАПЛИ УГЛЕВОДОРОД – ВОДА

Решение задачи о прогреве композитной капли углеводорода с водой представляет практический интерес при интенсификации процессов сжигания органического топлива. В литературе представлены как численные методы расчета теплообмена в композитной капле, так и аналитические [1,2]. Однако предложенное аналитическое решение имеет ряд принципиальных неточностей. Цель нашей работы предложить строгое аналитическое решение задачи, эскиз которой представлен на рис. 1, *а*.

Решается сферически симметричная задача о прогреве композитной капли. На поверхности капли задается условие теплообмена в соответствии гипотезой Ньютона. Внутри капли выставляется начальное распределение температуры. Задача приводится к безразмерному виду, что позволяет выделить определяющие параметры, управляющей динамикой прогрева.

Решение нестационарной задачи ищется в виде разложения по системе сферических функций Бесселя [3]. Причем в углеводороде в решение включаются сферические функции Бесселя первого и второго рода. В микрокапле воды используются только сферические первого рода, не имеющие особенности в нуле. На основе решения задачи Штурма – Лиувилля осуществлен расчет собственных функций и собственных значений. Используется условие сопряжения на межфазной границе, отражающее непрерывность температуры и теплового потока. Характеристическое уравнение для нахождения собственных значений решается численно. Выведено условие ортогональности собственных функций. На рис. 1, *б* представлен пример двух ортогональных собственных функций, определенных во всем объеме композитной капли. На основе разложения произвольной функции в ряд по системе собственных функций иллюстрируется корректность найденного функционального базиса для рассматриваемой задачи. Записано общее решение нестационарной задачи о распределении температуры в композитной капле, что дает возможность в любой момент времени вывести на экран распределение температуры в микрокапле воды и сферической оболочке углеводорода. Представлен прямой численный расчет корректности выполнения граничного условия на поверхности капли. Исследовано влияние начальных распределений, коэффициента теплоотдачи, объемной доли воды на динамику прогрева.

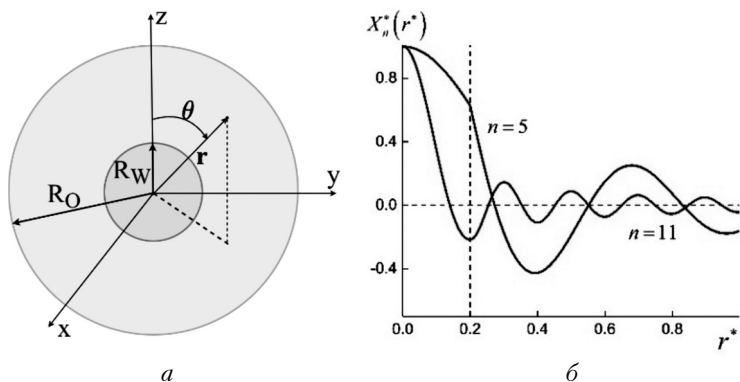
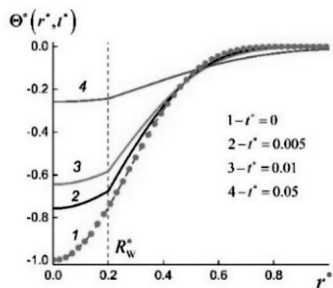


Рис. 1. Эскиз задачи о прогреве композитной капли (а) и пример ортогональных собственных функций задачи Штурма – Лиувилля (б)

Рис. 2. Динамика изменения температуры внутри композитной капли. Начальное распределение выбрано немонотонным с целью иллюстрации точности разложения произвольной функции по системе собственных функций задачи. Кривые – результаты расчета, точки – аналитическое задание начального распределения



Список литературы

1. **Sazhin S.S., Rybdylova O., Crua C.**, at al. A simple model for puffing/micro-explosions in water-fuel emulsion droplets // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2019. V.131. P. 815 – 821.
2. **Sazhin S.S., Bar-Kohany T., Nissar Z.** at al. A new approach to modelling micro-explosions in composite droplets // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2020. V. 161. 120238.
3. Практикум по уравнениям математической физики: учебное пособие / И.В. Деревич. СПб.: Лань, 2018. 428 с. ISBN 978-5-8114-2601-0.

I.V. Derevich, D.I. Matyukhina

Bauman Moscow State Technical University,
Russia 105005 Moscow, 2-nd Baumanskaya, 5

**THE CORRECT SOLUTION TO THE PROBLEM OF HEATING
A COMPOSITE DROP OF HYDROCARBON – WATER**

И.В. Деревич, Д.И. Матюхина

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
(исследовательский университет),
105005, г. Москва, 2-ая Бауманская, д. 5

РАСЧЕТ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПЕРЕГРЕВА ВОДЫ ПРИ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОМ РОСТЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СТЕНКИ

Предложено строгое аналитическое решение задачи о динамике прогрева слоя воды в экспериментальной установке [1]. В ходе эксперимента определялся перегрев первоначально недогретой воды по отношению к нормальной температуре кипения. При экспоненциальном росте температуры нагревателя до начала кипения можно ограничиться решением задачи теплопроводности. В [1] представлено приближенное аналитическое решение задачи методом преобразования Лапласа, которое справедливо на последней стадии прогрева воды.

Цель данной работы построить строгое аналитическое решение сопряженных задач теплопроводности в экспериментальной установке (рис. 1). Решение этой задачи позволит обоснованно рассчитать перегрев микрокапель воды при различной динамике прогрева композитной капли углеводород – вода [2]. Критерий начала кипения строится на основе сравнения давлений пара внутри и вне микропузырька в существенно неравновесных условия экспоненциального роста мощности [1].

Аналитическое решение нестационарной сопряженной задачи находится строгими методами уравнений математической физики [3]. В тепловой изоляции решается задача Штурма – Лиувилля и по найденной системе собственных функций рассчитывается нестационарное распределение температуры в слое тепловой изоляции (рис. 2, *a*). На основе общего вида нестационарного решения в виде ряда по собственным функциям задачи рассчитывается тепловой поток на поверхности нагревателя. На поверхности тонкого нагревателя задается экспоненциальный рост мощности.

В слое воды расчет температуры реализуется на основе одностороннего преобразования Фурье (рис. 2, *a*). В результате расчета тепловых потоков с поверхности нагревателя со стороны изоляции и воды рассчитывается реальный рост температуры обогреваемой стенки со стороны воды.

Результаты расчетов сопоставляются с экспериментальными данными [1]. Разработанная методика позволяет прогнозировать динамику перегрева первоначально недогретой воды до начала кипения при любом законе подвода мощности.

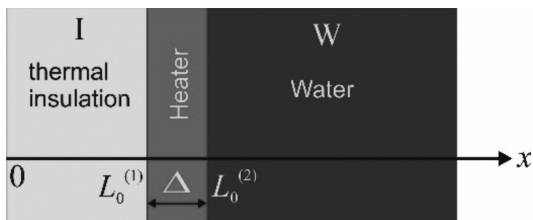


Рис. 2. Распределение нестационарной температуры в слое изоляции и воде (а). Тепловые мощности, выделяемые на поверхности нагревателя со стороны воды и тепловой изоляции (б). Линия – экспоненциальная аппроксимация

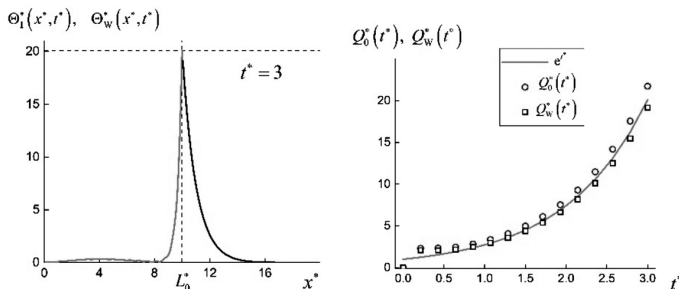


Рис. 1. Схема экспериментального стенда. Тепловая мощность подводится к узкому нагревателю. С левой стороны от нагревателя находится слой теплоизоляции. С правой стороны от нагревателя расположен большой объем неподвижной воды

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00243, <https://rscf.ru/project/23-29-00243/>

Список литературы

1. **Su G-Y, Bucci M., McKrell T., Buongiorno J.** Transient boiling of water under exponentially escalating heat inputs. Part I: Pool boiling // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2016. V. 96. P. 667 – 684.
2. **Sazhin S.S., Bar-Kohany T., Nissar Z.** at al. A new approach to modelling micro-explosions in composite droplets// *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2020. V. 161. 120238.
3. Практикум по уравнениям математической физики: учебное пособие / И.В. Деревич. СПб.: Лань, 2018. 428 с. ISBN 978-5-8114-2601-0.

I.V. Derevich, D.I. Matyukhina

Bauman Moscow State Technical University,
Russia 105005 Moscow, 2-nd Baumanskaya, 5

CALCULATION OF NON-STATIONARY OVERHEATING OF WATER WITH EXPONENTIAL INCREASE IN WALL TEMPERATURE

Н.Е. Шлегель, П.А. Стрижак

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ КАПЕЛЬ ВОДОМАЗУТНОГО ТОПЛИВА

В настоящее время в мире технологий первичного измельчения капель жидких топлив основаны на применении форсуночных и сплинкерных устройств [1,2]. Для распыления топлива используют, как правило, пневматические форсунки вследствие их относительной конструктивной и эксплуатационной простоты и надежности. По данным Росстата 84.7 % мазутного топлива используется на теплоэнергетических объектах, которые работают на нефтепродуктах, а именно количество объектов в теплоэнергетике, использующих мазут как основной вид топлива составляет 2357 – котельных и 7 – ТЭЦ. Нефтепродукты такие как мазут (НФО) зачастую используются в морских судах [3]. При распылении мазутного топлива существует ряд проблем, которые приводят к нестабильности горения факела. Во-первых, не полнота сгорания топлива при нехватке окислителя, тем самым приводит образованию сажи. Во-вторых, при перерасходе воздуха в форсуночном устройстве, капли топлива не успевают прогорать, что приводит к соударению капель о твердые поверхности. Такой эффект способствует образованию сажи на поверхностях оборудования, а в дальнейшем при ее выгорании приводит к локальному перегреву. При недостатках же окислителя капли соударяются о стенки форсуночного устройства, что приводит к неоднородности факела распыла. Мазут является хорошим альтернативным и экономичным топливом для энергетики и морского транспорта из-за его низкой цены и высокой теплотворной способности. Однако неполное и сложное сгорание тяжелого топлива приводит к высоким уровням выбросов. Для решения таких проблем необходимо использовать вторичное измельчение капель водомазутного топлива. Широкое применение схем вторичного измельчения капель жидких топлив в промышленных теплоэнергетических системах может способствовать снижению экологических и экономических показателей горения, а также увеличить энергоэффективность процесса сжигания.

Выполнены экспериментальные исследования характеристик вторичного измельчения капель водомазутного топлива при соударении с твердой подложкой, частицей и между собой. Установлены критические условия и характеристик вторичного измельчения капель водомазутной композиции.

Использованы три схемы: соударения капель между собой, с твердой стенкой и частицей. Для приближения условий опытов к газопарокапельным технологиям использовались варьируемые параметры: относительные концентрации воды и мазута, размеры капель (0,1 – 2,5 мм), скорости их движения (0 – 8 м/с), температура топлива (20 – 90 °С) и подложки (20 – 300 °С). Регистрируемые характеристики: режимы соударений, количество и размеры вторичных фрагментов, площадь поверхности жидкости. Построены карты режимов взаимодействия. Получены математические выражения для описания границ режимов взаимодействия. Вычислены площади поверхности капель водомазутной композиции после и до фрагментации. Сформулированы рекомендации по применению результатов исследований для развития технологий вторичного измельчения капель водомазутных топлив в приложениях. Показано, что даже высоковязкие топлива можно эффективно распылять при использовании схем первичного и вторичного измельчения капель. Определены наиболее эффективные технологические условия интенсивного вторичного измельчения мазута и водомазутной композиции.

Исследование выполнено за счет средств Российского научного фонда (проект № 22-79-00197, <https://rscf.ru/project/22-79-00197/>).

Список литературы

1. **Shebeleva A.A. et al.** Deformation of a Droplet of an Organic Water – Coal Fuel in a Gas Flow // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 2018. Vol. 59, № 4. P. 653 – 661.
2. **Alekseenko S. V et al.** Results of pilot-operating combustion of coal-water fuel in a low-capacity hot water boiler // Bull. Tomsk Polytech. Univ. Geo Assets Eng. 2017. Vol. 328, № 12. P. 16 – 28.
3. **Vedachalam S., Dalai A.K.** Hydrotreating and oxidative desulfurization of heavy fuel oil into low sulfur marine fuel over dual function NiMo/r-Al₂O₃ catalyst / Catal. Today. 2022.

N.E. Shlegel, P.A. Strizhak

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050, Lenin Ave.30

STUDY OF CHARACTERISTICS OF GRINDING WATER DROPS OF OIL FUEL

*Ю.А. Хахалев¹, М.И. Корнилова¹, В.Н. Ковальногов¹, А.В. Чукалин¹,
Л.В. Хахалева¹, Д.А. Демидов¹*

¹Ульяновский государственный технический университет,
432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32*

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ В ОКРЕСТНОСТИ ОДИНОЧНОЙ ТУРБИНЫ УЛЬЯНОВСКОГО ВЕТРОПАРКА

Введение. Развитие возобновляемой и альтернативной энергетики является одной из задач, поставленных перед специалистами, что нашло свое отражение в программе развития энергетики России [1]. В рамках развития этого направления был построен Ульяновский ветропарк. Для цифровизации с целью дальнейшего повышения эффективности его работы предпринимается исследование, позволяющее создать цифровой двойник Ульяновского ветропарка.

Численное исследование. Авторами был проведен численный анализ атмосферного пограничного слоя (АПС) в окрестности одиночной ветротурбины Ульяновского ветропарка и исследование ближнего следа за ветротурбиной. Сравнивались несколько наиболее часто применяемых моделей турбулентности. На сегодня применяются 3 метода численного моделирования следов ветротурбин: метод, использующий осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса (RANS), вихреразрешающее моделирование (LES) и прямое численное моделирование. Прямое численное моделирование авторы не использовали, так как данный метод требует больших вычислительных мощностей. Сравнивались модели $k-\epsilon$, $k-\omega$, модель напряжений Рейнольдса, модель Спаларта-Аллмареса и вихреразрешающая модель. Для расчетов применялся коммерческий пакет STAR CCM+ Academic Pack. Использовалась полигональная сетка. Размеры сетки выбирались с учетом обеспечения достаточной точности при минимальных затратах машинного времени на расчет.

На рис. 1 представлены результаты сравнительного анализа расчетов ближнего следа за ветротурбиной. Результаты численного расчета с использованием различных моделей турбулентности верифицировались по аналитической степенной зависимости дефицита скорости в следе за ветротурбиной от удаления от нее с показателем $-2/3$ [2]. Наилучшее приближение к аналити-

*Л.В. Хахалева, larvall@mail.ru

ческой зависимости продемонстрировала стандартная k-ε модель турбулентности. Погрешность не превысила 5 %.

Заключение. Проведено сравнение различных моделей турбулентности при численном исследовании ближнего следа за ветротурбиной.

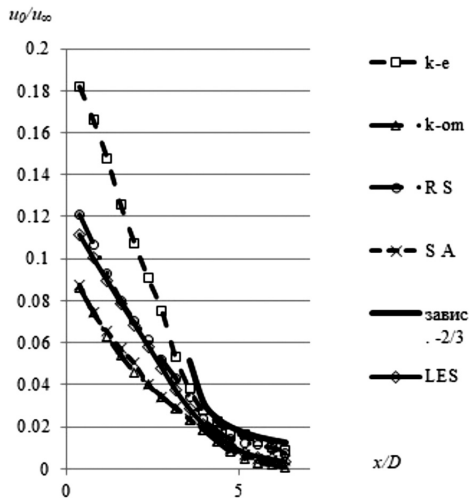


Рис. 1. Результаты расчетов ближнего следа за ветротурбиной

Материалы публикуются при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-19-00030, <https://rscf.ru/project/22-19-00030/>

Список литературы

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. Москва, 2009. 144 с.
2. Окулов В.Л. Роль физического моделирования в развитии роторной аэродинамики (обзор). Теплофизика и аэромеханика, 2018. 25(1). С. 1 – 22.

*Yu.A. Khakhalev, M.I. Kornilova, V.N. Kovalnogov, A.V. Chukalin,
L.V. Khakhaleva, D.A. Demidov*

Ulyanovsk State Technical University,
Russia 432027 Ulyanovsk, SeverniyVenets, 32

COMPARATIVE STUDY OF TURBULENCE MODELS IN MODELING THE ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER IN THE VICINITY OF A SINGLE TURBINE OF THE ULYANOVSK WIND FARM

*М.И. Корнилова, В.Н. Ковальников, Л.В. Хахалева, Р.В. Федоров,
А.В. Петров*

Ульяновский государственный технический университет,
432027, г. Ульяновск ул. Северный Венец, д. 32*

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ОКРЕСТНОСТИ ВЕТРОПАРКА

Введение. Развитие ветроэнергетики весьма многогранно, в настоящее время все большую популярность набирают комплексы ветровых турбин, объединённых в единую сеть, в виде ветропарков. Самые крупные ветропарки России расположены в Ростовской, Ульяновской областях, республике Калмыкия. Для поддержания эффективного аэродинамического режима ветропарка необходимо учитывать взаимное влияние ветровых турбин и атмосферного пограничного слоя (АПС).

Численное моделирование. Согласно существующим исследованиям [1, 2, 3] ветропарки оказывают заметное влияние на состояние АПС, что связано со значительной ролью ветряных турбин в замедлении ветра, создании турбулентности. Авторами был проведен численный анализ атмосферного пограничного слоя в окрестности семи ветровых турбин Ульяновского ветропарка. Для численного исследования выбран метод симуляции большого вихря – LES-метод (англ. Large Eddy Simulation). Выбор данного метода объясняется его способностью предсказывать нестационарную турбулентную структуру течения и различные турбулентные корреляции [1]. LES-метод позволяет адекватно моделировать сложное турбулентное движение воздушных масс в окрестности ветропарка.

Для расчета использован коммерческий пакет STAR-CCM+ Academic Pack. Геометрия расчетной области выполнена в масштабе 1:100. Использовалась сетка с многогранными ячейками, на поверхности лопастей проводилась сгущение сетки. Для вращающихся областей сетка была движущейся. Густота сетки варьировалась путем изменения базового размера ячеек, а именно: для сетки №1 базовый размер для ветрового туннеля составил 0,35 м, областей вращения – 0,25 м; для сетки №2 базовый размер для ветрового туннеля составил 0,25 м, областей вращения – 0,1 м; для сетки №3 базовый размер для ветрового туннеля составил 0,15 м, областей вращения – 0,05 м.

*М.И. Корнилова, masha.kornilova.1995@mail.ru

Результаты моделирования с использованием различных сеток верифицированы по известным литературным данным [2, 3]. Наилучшее приближение к верифицированной модели показали результаты с сеткой №3, погрешность составила не более 8 %. На рис.1 приведены результаты моделирования семи ветротурбин с данной сеткой. Скорость на входе задавалась градиентной, количество оборотов ветротурбин составило 10 об/мин. Дальнейшее измельчение сетки привело к увеличению машинного времени на расчет, а также к недопустимому увеличению невязок параметров модели.

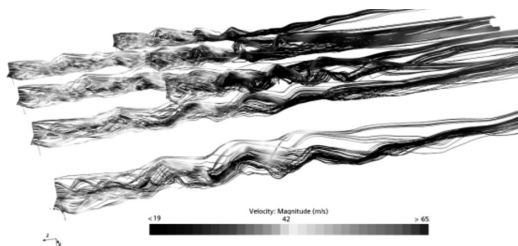


Рис. 1. Турбулентный след в окрестности ветропарка

Заклучение. Выполнена серия методических расчетов атмосферного пограничного слоя в окрестности ветровых турбин с варьированием густоты сетки и детально проанализировано влияние сеточных параметров на результат вычислений (сеточная сходимость).

Материалы публикуются при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-19-00030, <https://rscf.ru/project/22-19-00030>.

Список литературы

1. Vermeer L., Soresen J., Crespo A. Wind Turbine Wake Aerodynamics. Progress Aero Sci 2003; 39: 467-510 p.
2. Mehta D., Van Zuijlen A.H., Koren B., Holierhoek J.G., Bijl H. Large Eddy Simulation of Wind Farm Aerodynamics: A review. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 133 (2014);
3. Porte-Agel F., Yu-Tingwua, Yao Lu Large Large Eddy Simulstion of Atmospheric Boundary Layer Flow through Wind Turbines and Wind Farms. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2011; 154 – 168 p.

*M.I. Kornilov, V.N. Kovalnogov, L.V. Khakhaleva, R.V. Fedorov,
A.V. Petrov*

Ulyanovsk State Technical University,
Russia 432027 Ulyanovsk, SeverniyVenets, 32

NUMERICAL SIMULATION OF TURBULENT FLOWS IN THE VICINITY OF THE WIND FARM

А.Е. Пискунова, М.В. Пискунов, Н.А. Хомутов

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

СОУДАРЕНИЕ ЧАСТИЦ МИКРОГЕЛЯ С ГИДРОФОБНЫМИ ГЛАДКОЙ И НАНОВОЛОКНИСТОЙ ПОВЕРХНОСТЯМИ

Соударение частиц микрогеля является элементарным процессом, распространенным во многих практических приложениях: трехмерная печать и биопечать отверждаемыми полимерами [1], микропроизводство биоматериалов [2] и безопасный транспорт лекарств и клеточных структур [3]. Несмотря на это, механизм, характеристики и режимы гидродинамики для микрочастиц геля, взаимодействующих с твердой поверхностью, практически не изучены. Немногочисленные работы в этой области [4] сосредоточены, в основном, на изучении взаимодействия со стенкой отдельных шариков геля миллиметровых размеров. Однако, в 3D-печати и многих других приложениях размер частиц колеблется от нескольких микрон до нескольких сотен микрон [5]. Во многих приложениях происходит формирование слоя жидкости, что подразумевает взаимодействие частиц со смоченной той же жидкостью поверхностью. Таким образом, в качестве цели данной работы рассматривается прикладное исследование формирования биополимерного слоя с контролируемыми геометрическими параметрами на основе эмпирического моделирования диаметра и высоты частиц микрогеля в ходе их взаимодействия с гидрофобными гладкой и нановолокнистой поверхностями.

Для формирования частиц микрогеля методом ионного сшивания используется полимерный водный раствор альгината натрия (ALG), сшиваемый с помощью водного раствора хлорида кальция (CaCl_2), содержащего 10% этилового спирта (EtOH). Для реализации метода разработана система подачи потоков жидкостей, в которой микроструя полимера в виде структуры «бусины-на-нити» взаимодействует с однородной микроструей сшивающего агента. В ходе воздушного взаимодействия микроструй получены образцы микрогеля G1-G4 с различной степенью гелеобразования в виде частиц одинакового размера и почти сферической формы, соединенные жидкостными мостами. Такая структура микроструи полимера стала возможна благодаря внешнему вибрационному воздействию от многослойного пьезоэлектрического привода. Подача растворов полимера и кросслинкера осуществляется шприцевыми насосами с расходами 9 и 8 мл/мин, соответственно, с помощью шприцевых игл с тупым

*А.Е. Пискунова, aes41@tpu.ru (E-mail одного из авторов)

наконечником (внутренний диаметр 0,21 мм). Для крепления игл разработаны и напечатаны специальные пластиковые каркасы с необходимыми технологическими отверстиями. Сформированный поток частиц микрогеля взаимодействует с твердой стенкой, в качестве которой используются гладкая (на молекулярном уровне) сапфировая поверхность и нановолокнистое покрытие с гидрофобными свойствами, изготовленное методом электроспиннинга из 5 % раствора сополимера винилиденфторида с тетрафторэтиленом. Видеорегистрация процесса взаимодействия проведена сбоку под углом 90° относительно оси результирующего потока с использованием высокоскоростной видеокамеры.

Выведены эмпирические модели для максимального диаметра стекания и высоты после стекания на гладкой и нановолокнистой поверхностях, включающие степень гелеобразования и шероховатость поверхности. Выполнена проверка применимости модели за счет прогнозирования площадей контакта на гладкой и нановолокнистой поверхностях. Предложена концепция технологии формирования биополимерного слоя с контролируемыми геометрическими параметрами в рамках технологии 3D-биопечати на нановолокнистом покрытии и оценен ряд технологических параметров перемещения узла биопечати с микросопами.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20109, <https://rscf.ru/project/22-29-20109/> и средств Администрации Томской области.

Список литературы

1. **Visser C.W., Kamperman T., Karbaat L.P., Lohse D., Karperien M.** In-air microfluidics enables rapid fabrication of emulsions, suspensions, and 3D modular (bio)materials, *Sci. Adv.* 2018. V. 4.
2. **Oliveira S.M., Reis R.L., Mano J.F.** Towards the design of 3D multiscale instructive tissue engineering constructs: Current approaches and trends, *Biotechnol. Adv.* 2015. V. 33. P. 842 – 855.
3. **Leijten J., Khademhosseini A.** From Nano to Macro: Multiscale Materials for Improved Stem Cell Culturing and Analysis, *Cell Stem Cell.* 2016. V. 18. Pp. 20 –24.
4. **Jambon-Puillet E., Jones T.J., Brun P.T.** Deformation and bursting of elastic capsules impacting a rigid wall, *Nat. Phys.* 2020. T. 16. Pp. 585 – 589.
5. **Son Y., Kim C.** Spreading of inkjet droplet of non-Newtonian fluid on solid surface with controlled contact angle at low Weber and Reynolds numbers, *J. Nonnewton. Fluid Mech.* 2009. V. 162. Pp. 78 – 87.

A.E. Piskunova, M.V. Piskunov, N.A. Khomutov

National Research Tomsk Polytechnic University,
Russia 634050 Tomsk, 30, Lenin Avenue

COLLISION OF MICROGEL PARTICLES WITH SMOOTH AND NANOFIBER HYDROPHOBIC SURFACES

Э.С. Цырендоржиев^{1,2}

¹АО ГНЦ «Центр Келдыша», Москва, Россия
125438, г. Москва, ул. Онежская, д. 8

²Московский физико-технический институт (государственный университет),
Россия, Московская область, 141701, г. Долгопрудный,
Институтский переулок, д. 9

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА УЧАСТКАХ ПАССИВНОЙ РАБОТЫ

Повышающиеся требования к надёжности ракетных двигателей и двигателей установок подразумевает проведение не только большого количества натуральных испытаний, но и создания математических моделей процессов, происходящих в них, одним из таких процессов является перенос тепла по конструкции.

На текущий момент в большинстве случаев для моделирования тепловых режимов используются упрощенные методики [1, 2] как ввиду сложности конфигураций изделий ракетно-космической отрасли, так и ввиду многообразия используемых материалов.

Увеличение точности моделей теплового состояния изделий может быть достигнуто за счёт использования средств компьютерного моделирования. Для отечественного рынка таким решением является пакет программ «ЛОГОС» [2].

Несмотря на многообразие задач, которые способен решить данный инструмент, специфичность процессов, влияющих на температурные поля в компонентах жидкостных ракетных двигателей, требует расширения функционала за счёт интеграции авторских модулей.

В результате решения отдельных индустриальных задач в АО ГНЦ «Центр Келдыша» были разработаны методики, позволяющие с достаточной точностью прогнозировать тепловое состояние изделий. Данные решения могут быть нацелены на воспроизведение граничных условий, моделирования процессов; создания расчётов с геометрией, изменяющей конфигурации с течением времени и создания систем с обратной связью.

Основой методики для создания модели теплового режима изделия является использование пакета конечно-элементного анализа «ЛОГОС-Тепло». Данный модуль предназначен для решения уравнения теплопроводности в трехмерной постановке для геометрий произвольной формы. Дальнейшее развитие компьютерной модели зависит от потребностей заказчика: моделирование свободноконвективного течения в баках, кондуктивно-конвективного течения топлива по трубопроводам, создание модели фильтрационного горения жидкого топлива, учёт влияния солнечного излучения на конструкцию в течение полёта и создание моделей материалов со специфичной физикой.



Рис. 1. Структура компьютерной модели ракетного двигателя

Данная работа посвящена демонстрации моделей теплового создания различных изделий, работающих в режиме пассивного полёта, тепловые модели которых потребовали внедрения пользовательского функционала.

Представленные модели были верифицированы и валидированы путём сравнения результатов численного моделирования с аналитическими решениями, результатами, представленными в литературе и кросс-верификации с другими программными средствами.

Список литературы

1. Авдучевский В.С., Галицкий Б.М., Глебов Г.А. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике. М.: Машиностроение, 1992. 528 с.
2. Козелков А.С., Дерюгин Ю.Н., Зеленский Д.К., Глазунов В.А., Голубев А.А., Денисова О.В., Лашкин С.В., Жучков Р.Н., Тарасова Н.В., Сизова М.А. Многофункциональный пакет программ ЛОГОС для расчета задач гидродинамики и тепломассопереноса на суперЭВМ: базовые технологии и алгоритмы // Супервычисления и математическое моделирование. Труды XII международного семинара / под ред. Р.М. Шагалиева. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИ-ЭФ», 2011, С. 215 – 229.

E.S. Tsyrendorzhiev^{1,2}

¹ Keldysh Research Centre, Moscow, Russia
Russia, 1254388, Moscow, Onezhskaya, 8

²Moscow institute of physics and technology
Russia, Moscow Region, Dolgoprudnyy, 141701, Institutsky Lane, 9

NUMERICAL MODELLING OF THE THERMAL STATE OF LIQUID-PROPELLANT ROCKET ENGINES OPERATING IN PASSIVE MODE

Е.А. Шувалов¹, С.В. Веретенников²

¹ ФГБОУ ВО Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьева,
152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, д. 53

АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ

При эксплуатации вихревых устройств использующих несжимаемую жидкость в качестве рабочего тела, возможна реализация различных эффектов начиная от разделения жидкости на разные фракции и заканчивая протеканием химических реакций. Гидродинамические потоки в технических устройствах являются источником звукоизлучения, а при изменении структуры течения за счет появления разнообразных физических процессов, изменяется спектр и интенсивность шума. Исследование взаимосвязи между изменением структуры закрученного потока и акустическим излучением может способствовать, как и более детальному изучению протекающих процессов в вихревых устройствах, так и совершенствованию их конструкции.

Объектом исследования являлась вихревая труба, где вода применялась в качестве рабочего тела [1]. В состав экспериментальной модели входит: корпус, со встроенным закручивающим устройством, где к нему присоединены вихревая камера задиафрагмированная с одной стороны и имеющая дросселирующее устройство и крестовину с другой стороны. Установка оснащена подводными трубопроводами из ПВХ, регулирующими задвижками и центробежным насосом. Закрутка потока осуществляется за счет тангенциального патрубка, который осуществляет плавный подвод несжимаемой жидкости в закручивающее устройство с прямоугольным соплом. В вихревой камере формируется противоточное закрученное течение с выходом приосевого потока через диафрагму, а периферийного через дроссель-крестовину. Для получения физических параметров на каждом выходном патрубке установлены электромагнитный расходомер, а также датчики давления и температуры.

Выполнена визуализация структуры закрученного потока на 3 режимах в вихревой камере и в выходном патрубке за диафрагмой. В качестве параметра характеризующего интенсивность противотока является относительная доля потока μ , определяемая как отношение расхода на выходе из диафрагмы к расходу на входе в вихревую камеру. В ходе испытаний варьировалось давление на входе в вихревую трубу, а также регулировалось соотношение расходов воды μ .

В области вихревой камеры формируется два потока несжимаемой жидкости: периферийный протекающий от закручивающего устройства в сторону дросселированного выхода и приосевое противоточное течение направленное в сторону диафрагмы. В ходе визуализации отмечена явная зависимость между соотношением расходов μ и структурой противоточного закрученного течения. На режиме соответствующему $\mu = 0$ (режим одноосходной вихревой трубы) приосевой поток в вихревой камере имеет максимальный диаметр, в приосевой области закручивающего устройства имеется зона пониженных скоростей, где течение практически отсутствует и весь поток движется по периферии.

При дросселировании противоположной диафрагме выхода вихревой камеры значительно увеличивается расход приосевого течения. Исследованы два режима соответствующих $\mu = 1$ и $\mu = 0,96$. Структура приосевого потока при этом заметно изменяется и принимает вид двух спиральных жгутов вращающихся вокруг своей оси. На этих режимах в патрубке за диафрагмой движется приосевой поток, в котором образуются мелкие пузыри. Можно предположить, что в закрученном течении происходит кавитация.

Выполнено акустическое исследование вихревой трубы внешними микрофонами с анализатором спектра. Анализ полученных результатов, на режимах $\mu = 1$ и $\mu = 0,96$, позволяет сделать вывод, что в среднечастотной и высокочастотной областях спектра общая интенсивность шума практически не изменилась, что может означать о не значительном изменении структуры закрученного потока не сжимаемой жидкости. Наблюдаются отдельные максимумы акустического излучения на частоте 4 и 18 кГц. При переходе режимов с $\mu = 1$ на $\mu = 0$, общая интенсивность шума понижается на 5 дБ в среднечастотной области спектра, и повышается на 5 дБ в высокочастотной области спектра. Предполагается, что данное изменение связано с перестройкой структуры закрученного течения и образованием более мелкомасштабных вихревых структур.

Список литературы

1. **Xue Y.** Experimental Investigation of the Flow Characteristics within a Vortex Tube with Different Configurations // Y. Xue, J. R. Binns, M. Arjomandi, H. Yan. International Journal of Heat and Fluid Flow 75, 2019. Pp. 195 – 208.

E.A. Shuvalov¹, S.V. Veretennicov²

¹ Soloviev Rybinsk State Aviation Technical University,
Russia 152934 Rybinsk, Pushkina, 53

ACOUSTIC CHARACTERISTICS AND VISUALIZATION OF THE STRUCTURE OF A SWIRLING FLOW OF INCOMPRESSIBLE LIQUID

А.А. Колесова¹, С.В. Веретенников¹, Е. Г. Колесова²

¹ Рыбинский государственный авиационный технический университет
им. П.А. Соловьева,

152934, Ярославская область, г. Рыбинск, ул. Пушкина, д. 53

²ПАО «ОДК Сатурн», 152903, Ярославская обл., г. Рыбинск, пр. Ленина, д. 163

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАЩИТНОЙ ПЕЛЕНЫ ЗА ОТВЕРСТИЕМ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРАХ ВДУВА

Развитие газотурбинных двигателей, напрямую связано с повышением параметров рабочего процесса (температура газа, степень сжатия, полнота сгорания топлива и др.). Таким образом, в настоящий момент температура газа перед турбиной может превышать 2000К, а материалов способных выдерживать такие высокие температуры не существует, поэтому для функционирования сопловых и рабочих лопаток турбины необходимо совершенствование их схем охлаждения. В газотурбинных двигателях охлаждение лопаток в основном реализуется с помощью конвективного метода (охлаждающий воздух циркулирует во внутренних полостях лопатки) и заградительного (защитная пелена выдувается на внешнюю поверхность лопатки и охлаждает область вдува и поверхность за ней).

Повышение эффективности заградительного (пленочного) охлаждения в основном связано с изменениями геометрии отверстия для вдува защитной пелены и расположением отверстий относительно друг друга (шаг между отверстиями, угол наклона к стенке). В научно-технической литературе представлено большое количество работ по экспериментальному и численному исследованию различных форм отверстий: цилиндрических, веерных, типа-laidback, щелевых и консольных [1], антивихревых [2] и др. Однако в настоящий момент технологически освоено изготовление отверстий только цилиндрической, веерной и laidback формы.

В данной работе представлены результаты численного исследования вдува защитной пелены через одиночное отверстие различной геометрической формы при изменении параметра вдува (1) от 0,5 до 2:

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

где $\rho_{\text{охл}}$, ρ_{Γ} – плотности холодного и охлаждающего воздуха; $V_{\text{охл}}$, V_{Γ} – скорости холодного и горячего воздуха.

Для проведения исследования была разработана геометрическая модель с пятью различными формами отверстий: цилиндрической, веерной с длинной расширяющегося участка 1 калибр и 3 калибра, отверстие типа laidback с длинной расширяющегося участка 1 калибр и комбинированное отверстие (веерное и laidback, с длинной расширяющегося участка 2 и 1 калибр соответственно).

Численное моделирование выполнялось на SST модели турбулентности. В качестве граничных условий задавалась температура основного и вторичного потока, параметр вдува рассчитывался в зависимости от расхода. По результатам численного моделирования было получено, что за отверстием цилиндрической формы формируется пелена охладителя при параметре вдува от 0,5 до 1, при параметре вдува $m > 1,5$ пелена у поверхности не формируется. За отверстием цилиндрической, веерной формы с коротким диффузорным участком и отверстием типа laidback при $m > 0,5$ формируется зона обратных токов, что приводит к снижению концентрации охладителя у защищаемой поверхности, за веерным отверстием с длинным диффузорным участком и комбинированным отверстием данного явления не наблюдалось. Таким образом, концентрация охладителя у поверхности на удалении 10 калибров от места вдува при $m = 1$ за комбинированным отверстием на 5 % больше, чем за веерным отверстием с длинным диффузорным участком, и на 24 % выше, чем за отверстием типа laidback.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда да № 23-29-00666.

Список литературы

1. Sargison J.E., Guo S.M., Oldfield M.L.G., Lock G.D., and Rawlinson A.J. A Converging Slot-Hole Film-Cooling Geometry Part 1: Low-Speed Flat-Plate Heat Transfer and Loss // Proceedings of ASME Turbo Expo, 2001-GT-0126, New Orleans, Louisiana, USA. 2001.

2. Dhungel A., Lu Y., Philips A., Ekkad S.V. and Heidmann J. Film Cooling from a Row of Holes Supplemented with Anti Vortex Holes // Journal of Turbomachinery, 131(2), 021007. 2009.

A.A. Kolesova¹, S.V. Veretennikov¹, E.G. Kolesova²

¹ Rybinsk State Aviation Technical University. P.A. Soloviev
152934, Yaroslavl region, Rybinsk, st. Pushkina, 53

²PJSC UEC Saturn, 152903, Yaroslavl region, Rybinsk, Lenin Ave., 163

COMPUTATIONAL INVESTIGATION OF THE FORMATION OF A PROTECTIVE SHIELD BEHIND A HOLE OF DIFFERENT GEOMETRIC SHAPES FOR DIFFERENT BLOWING PARAMETERS

Е.А. Михайлов^{1,2}, А.П. Степанова¹, А.А. Таранюк¹

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1*

² Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ МЕЖДУ ПЛОСКОСТЯМИ

Введение. Электровихревые течения возникают при прохождении электрического тока с меняющейся плотностью через жидкости с высокой проводимостью, например, расплавы металлов. Они играют важную роль в прикладных задачах, связанных с электросваркой и электрошлаковым переплавом [1]. Первые теоретические работы, связанные с электровихревыми течениями, содержали в основном качественные оценки поведения жидкости. По мере развития вычислительной техники, все большую роль играют методы прямого численного моделирования, связанные с использованием стандартных пакетов. Между тем, подобные подходы не дают полного представления о принципиальном характере течения. Кроме того, решение полных трехмерных задач нередко оказывается не под силу даже современным суперкомпьютерам. По этой причине особую роль играют двумерные модели, позволяющие как получить асимптотические решения, так и исследовать процесс численно с использованием ограниченных ресурсов. В настоящей работе исследуется электровихревое течение между двумя плоскостями. Предполагается, что ток распространяется от двух электродов одинаковой полярности к третьему, удаленному на большое расстояние [2]. Исследуются интенсивные токи, которые характеризуются нелинейными слагаемыми.

Основные уравнения. Будем предполагать, что скалярная функция тока в цилиндрических координатах для течения может быть представлена в автомоделном виде $\psi(r, z, t) = r^2 F(z, t)$. Тогда задача об эволюции функции в F безразмерных переменных будет выглядеть так:

$$F|_{z=0} = F|_{z=1} = \frac{\partial F}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{\partial F}{\partial z} \Big|_{z=1} = 0,$$

где S – параметр электровихревого течения. Особый интерес представляет решение стационарной задачи, когда F не зависит от времени. Ключевую роль играет второе слагаемое, описывающее нелинейные эффекты.

* Е.А. Михайлов, ea.mikhajlov@physics.msu.ru

Решение задачи. В настоящей работе стационарное решение ищется в виде разложения по параметру S [3]:

$$F(z) = \sum_{n=1}^{\infty} S^n F_n(z);$$

где $F_n(z)$ ищутся по методу последовательных приближений

$$\frac{d^4 F_1}{dz^4} = z - 1/2; \quad \frac{d^4 F_n}{dz^4} = \sum_{m=1}^n F_m \frac{d^3 F_{n-m}}{dz^3}.$$

Мы получили несколько первых коэффициентов разложения для нелинейной задачи. На рис. 1 показаны результаты для приближенного решения, построенного в виде ряда, и эволюции F , полученной численно.

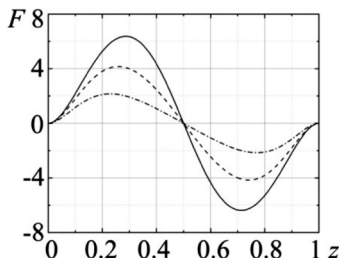


Рис. 1. Зависимость $F(z)$.
Сплошная линия показывает аналитическое приближение, штрихпунктирная – численное решение для $t = 0,015$, пунктирная – численное решение для $t = 0,025$

Выводы. Получены численные и асимптотические результаты для электровихревого течения между плоскостями.

Список литературы

1. Электровихревые течения / В.В. Бояревич, Я.Ж. Фрейберг, Е.И. Шилова, Э.В. Щербинин. Рига: Зинатне, 1985. 315 с.
2. Михайлов Е.А., Чудновский А.Ю. Асимптотическое разложение решения уравнения для медленного осесимметричного электровихревого течения между двумя плоскостями // Сиб. журн. инд. матем., 2020. Т. 23. С. 88 – 100.
3. Михайлов Е.А., Степанова А.П., Таранюк А.А. Анализ и модель системы электровихревых течений между двумя плоскостями при больших токах // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 1. С. 32 – 42.

E.A. Mikhailov^{1,2}, A.P. Stepanova¹, A.A. Taranyuk¹

¹ Lomonosov Moscow State University,
Russia 119991 Moscow, Leninskie gori, 1

² Lebedev Physical Institute,
Russia, 119991 Moscow, Leninsky prospect, 53

NONLINEAR EFFECTS FOR ELECTROVORTEX FLOWS BETWEEN TWO PLANES

А.С. Дмитриев, П.Г. Макаров, Е.Д. Матвеев, А.П. Соколова

Национальный Исследовательский Университет «МЭИ»,
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14*

ТЕРМОИНДУЦИРОВАННАЯ УПРАВЛЯЕМАЯ ФЛОТАЦИЯ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В ВОДНОЙ ВЗВЕСИ

Введение. В современном мире человечество столкнулось с проблемой колоссального количества мусора: число свалок растет, уровень загрязнения природных водоемов одними лишь твердотельными отходами достигает пугающих масштабов. В таких условиях особенно острой становится проблема сбора, разделения, переработки и утилизации отходов. Данная проблема формулирует задачи разработки новых эффективных способов утилизации отходов производства и потребления. Все они так или иначе связаны с этапом разделения отходов на фракции по материалам: бумага, стекло, металлы, пластмассы и т.д. и, кроме того, не решают проблему сортировки уже существующих скоплений «смешанных» отходов.

Существующие методы сортировки твердотельных отходов основываются на различных физических принципах: магнитные свойства материалов, их плотность, светопропускание и т.п. В настоящей работе изучается метод сортировки, основанный на всплытии пузырькой газа с захваченными частицами засыпки. На похожем явлении основывается разделение материалов в горнодобывающей промышленности. Однако там флотационная сортировка неразрывно связана с добавлением поверхностно-активных веществ для лучшей коагуляции мелкодисперсных частиц. Возможным способом избежать применения химических добавок является термоиндуцированная флотация, также именуемая эффектом «прыгающих пузырей».

Результаты. Экспериментально и теоретически было определено влияние температуры жидкости на скорость и высоту подъема комплексов «пузырь + гранула». Для всех рассматриваемых типов комплексов было обнаружено увеличение скорости и высоты подъема с ростом температуры жидкости. В ходе экспериментов было обнаружено, что при увеличении температуры жидкости скорость всплытия комплексов, состоящих из металлических гранул, на 15 % больше скорости всплытия комплексов из пластмассовых гранул (рис. 1). При этом было показано, что комплексы с участием пластмассовых

*П.Г. Макаров, MakarovPG@mpei.ru

гранул поднимаются на максимальную высоту столба жидкости при гораздо меньших температурах. Была рассчитана эффективность разделения различных конфигураций засыпок. Установлено, что увеличение количества разделяемых частиц, и снижение концентрации растворенного в воде воздуха положительным образом влияет на эффективность сепарирования. Максимальная эффективность достигала 99,5 % в опытах с использованием гранул цилиндрической формы размером 300 мкм на 450 мкм в дегазированной воде.

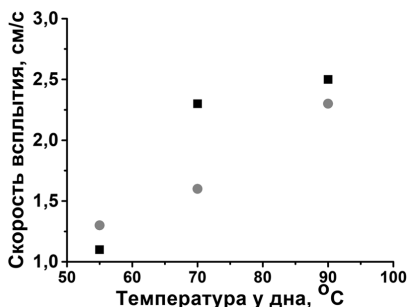


Рис. 1. Скорость подъема комплексов «пузырь + гранулы»: красные круги – металлические; черные квадраты – пластмассовые

Заключение. Экспериментально изучена динамика движения комплексов участвующих в прыгающем кипении при различных вариантах засыпки, степени аэрации воды, перегреве. В частности, было выявлено, что при одновременной засыпке металлических и пластмассовых гранул одинаковых формы и объема в первую очередь всплывают пластмассовые гранулы, что в перспективе может быть полезно для поэтапного сбора и разделения пластиковых и металлических отходов. Также произведена оценка эффективности разделения смесей мезоскопических частиц различных материалов методом термофлотации.

Список литературы

1. Дмитриев А.С., Макаров П.Г., Эльбуз М.А. О новом режиме пузырькового кипения в мезоструктурах микросфер (эффект прыгающих пузырей) // Письма в Журнал технической физики. 2015. Т. 41. № 6. С. 67 – 72
2. Теплопередача. Издание четвертое, переработанное и дополненное / В.П. Исаченко, В.А.Осипова, А.С. Сукомел. М: Энергоиздат, 1981. 415 с.

A.S. Dmitriev, P.G. Makarov, Y.D. Matveev, A.P. Sokolova

National Research University “MPEI”,
Russia 111250 Moscow, Krasnokazarmennaya st, 14

THERMOINDUCED CONTROLLED FLOTATION OF SOLID PARTICLES IN WATER

*О.О. Мильман^{1,2}, В.Б. Перов¹, А.В. Кондратьев^{1,2,3}, А.В. Птахин^{1,2,3},
В.С. Крылов^{1,2}*

¹ ЗАО НПВП «Турбокон»,

248010, г. Калуга, ул. Комсомольская Роща, д. 43

² ФГБОУ ВО Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского,
248023, г. Калуга, ул. Степана Разина, д. 26*

³ КФ ФГБОУ ВО «МГТУ имени Н.Э. Баумана (НИУ)»,
248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РЕГАЗИФИКАЦИИ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА В ТРУБАХ

Сжиженный природный газ (СПГ) в настоящее время стал гораздо более востребован в связи с политической ситуацией в Европе и в мире. Кроме того, мазута как резервное топливо для ТЭЦ сильно уступает СПГ, который можно производить на самих станциях. Обычно для регазификации СПГ используются воздушные теплообменники, имеющие низкую эффективность, а вследствие этого большую площадь теплообмена и высокие капитальные затраты. В качестве альтернативы могут быть использованы регазификаторы, использующие в качестве греющей среды оборотную воду ТЭЦ. Для отработки технических решений по теплообменным аппаратам подобного типа был разработан и испытан опытный образец утилизационного регазификатора сжиженного газа (УРСГ). Полученные в результате его исследований зависимости коэффициентов теплопередачи от расходов теплоносителей будут использованы при проектировании полноразмерных УРСГ, предназначенных для эксплуатации на ТЭЦ.

Принципиальная схема стенда для испытаний УРСГ представлена на рисунке 2. Теплофизические свойства азота определялись по [1].

Предложенная конструкция позволяет осуществлять испарение жидкого азота с расходом до 82 кг/ч.

В результате испытаний получены коэффициент теплопередачи в зоне перегрева 60...80 Вт/(м²·К).

Номинальный расход греющей воды 1500 кг/ч (1000 кг/ч с учётом того, что работала только одна зона кипения и зона перегрева, в то время как расход воды распределялся равномерно по трём зонам) обеспечивает температуру азота на выходе из опытного образца УРСГ не менее плюс 10 °С.

*О.О. Мильман, turbocon@kaluga.ru

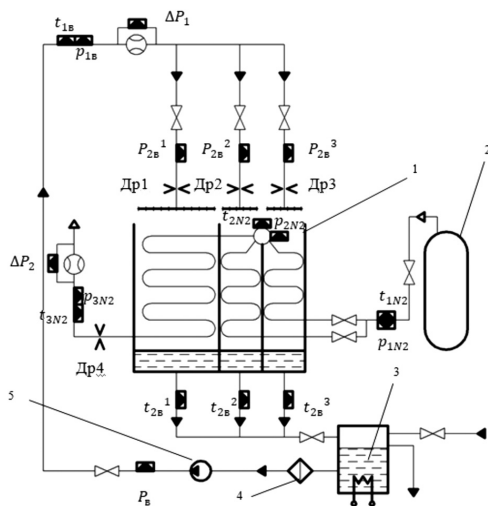


Рис. 1. Схема экспериментального стенда для испытания опытного образца УРСГ:

1 – опытный образец УРСГ; 2 – криобак; 3 – бак запаса воды; 4 – фильтр; 5 – насос с частотным преобразователем

Научные исследования проведены при финансовой поддержке государства в лице Российского научного фонда, Грант РНФ №22-19-00495.

Список литературы

1. **Lemmon E.W. et al.** Thermodynamic properties of air and mixtures of nitrogen, argon, and oxygen from 60 to 2000 K at pressures to 2000 MPa //Journal of physical and chemical reference data. 2000. V. 29. №. 3. Pp. 331 – 385.
2. **Холодильная техника.** Энциклопедический справочник. Кн. 1; под ред. Ш.Н. Кобулашвили. Госторгиздат, 1960.

O.O. Milman^{1,2}, V.B. Perov¹, A.V. Kondratev^{1,2,3}, A.V. Ptakhin^{1,2,3}, V.S. Krylov^{1,2}

¹ CJSC SPC «Turbocon»,

Russia, 248010 Kaluga, Komsomolskaya Roscha st., 43

² Kaluga State University named after K. E. Tsiolkovski,
Russia, 248023, Kaluga, Stepan Razin st., 26

³KB of Bauman Moscow State Technical University,
Russia, 248000, Kaluga, Bazhenov st., 2

RESEARCH OF PROCESSES OF REGASIFICATION OF LIQUEFIED NATURAL GAS IN TUBES

О.В. Митрофанова^{1,2}, А.В. Федоринов^{1,2}

¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
115409, г. Москва, Каширское ш., д. 31

² Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1*

РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СМЕШЕНИЯ ПЕТЛЕВЫХ ПОТОКОВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В СУДОВОЙ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКЕ

В процессе эксплуатации судовых ЯЭУ нередко возникают ситуации «несимметричного» режима работы реактора. Данное явление может быть вызвано рядом причин, к примеру, отключением по второму контуру одного из парогенераторов с продолжением работы соответствующего циркуляционного насоса первого контура, либо осуществление циркуляции в петле с охлажденным теплоносителем. Ввод жидкого поглотителя в первый контур также создает несимметричные условия подвода теплоносителя в корпус реактора. Неполное перемешивание потоков теплоносителя внутри ядерного реактора при таких режимах работы приводит к ухудшению теплотехнического состояния активной зоны и локальным изменениям реактивности.

Для изучения процессов смешения неравновесных потоков внутри судовой реакторной установки на базе ОКБМ в Нижнем Новгороде был построен экспериментальный стенд модели корпуса судового реактора и проведены соответствующие измерения [1]. В настоящей работе предложен метод численного исследования перемешивания потоков теплоносителя с помощью 3D моделирования процессов гидродинамики и теплообмена с использованием программного комплекса ANSYS, включающего расчетный пакет CFX, и применения модели турбулентности Shear Stress Transport (- ω SST).

Постановка задачи в численном моделировании основывалась на условиях проведения экспериментов, в которых применялась концепция «соленого» потока, описывающая распределение поля температур. Принималось, что на один из четырех подводящих патрубков радиально подавался раствор соли Na_2SO_4 , на другие три – дистиллированная вода. Сама соль и ее концентрация подбирались таким образом, чтобы она не оказывала значительного влияния на плотность и вязкость среды в потоке. Граничные условия были поставлены в соответствии с экспериментом.

*А.В. Федоринов, andrefedorinov@yandex.ru

Результаты сравнения показали, что, аналогично экспериментальным данным, горячий теплоноситель перемещается в опускной камере реактора (ОКР) по часовой стрелке. В среднем поясе ОКР «горячее пятно» отклоняется на 90° от горячего патрубка, а в нижнем поясе – на 180° . Перед входом в активную зону разница температур между двумя диаметрально противоположными областями достигает значения в 40 %. Для количественного сравнения результатов расчета и эксперимента был построен график, на котором отображены значения относительного изменения температуры по окружности среднего пояса ОКР в сравнении относительным солесодержанием. Точки определения температуры в количестве восьми штук аналогичны расположению стержневых датчиков проводимости, применяемым в эксперименте. Результаты продемонстрировали приемлемую точность предложенного расчетного метода.

Кроме того, авторами эксперимента было предсказано наличие донного вихря в нижней камере реактора. Результаты численного моделирования подтверждают это предположения. Примечательно, что донный вихрь формирует кольцевую область, в которой значение полной скорости теплоносителя на входе в активную зону практически в два раза превышает ее среднее значение.

Полученное в результате проведения системных расчетов качественное и, в пределах погрешностей, количественное совпадение с экспериментальными данными доказывает хорошую приемлемость использования модели турбулентности k - ω SST для расчета сложных закрученных течений.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда: грант РФФ № 23-29-00373, <http://rscf.ru/project/23-29-00373/>

Список литературы

1. Расчетно-экспериментальное моделирование нестационарных процессов смешения потоков теплоносителя в перспективных ЯЭУ для АЭС малой мощности / А.А. Баринов: дис. ... канд. тех. наук: 05.14.03. Н.Н., 2020. 192 с.

O. V. Mitrofanova^{1,2}, A. V. Fedorinov^{1,2}

¹ National Research Nuclear University MEPHI,
Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe sh., 31

² National Research Center «Kurchatov Institute»,
Russia, 123182 Moscow, pl. Academician Kurchatov, 1

COMPUTATIONAL MODELING OF THE PROCESS OF MIXING LOOP COOLANT FLOWS IN A SHIP REACTOR PLANT

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ БИОМАССЫ В ПОТОЧНОМ ГАЗИФИКАТОРЕ

Современные экологические требования вынуждают переходить с «грязного» угля на «чистую» биомассу. Это вызывает множество новых проблем. Первая проблема связана с низкой теплотой сгорания биомассы. По сравнению с углём в ней содержится меньше углерода, но больше кислорода. Теплонапряжения внутри газификатора снижаются, что делает невозможным работу на воздушном дутье. Кроме того, сырая биомасса имеет влажность около 50 %, что вынуждает либо сушить биомассу до влажности 10 – 20 %, либо тарифицировать её, удаляя почти всю влагу. Второй проблемой является волокнистая структура биомассы, которая препятствует тонкому помолу биомассы. Данную проблему решают также торрефикацией биомассы, однако затраты на торрефикацию могут превышать выигрыш от мелкого помола биомассы. Это приводит к необходимости адаптации поточных газификаторов для работы с частицами большого размера (до 1 мм против угольных 0,1 мм)). Частицы такого большого размера с одной стороны дольше конвертируются, а с другой сильно подвержены силе тяжести. С первым позволяет бороться второе – переменная площадь живого сечения канала делает возможным регулирование скорости газа таким образом, чтобы крупные частицы находились в газификаторе достаточное для полной конверсии время.

Работа посвящена численному исследованию движения частиц биомассы в поточном газификаторе. В качестве объекта исследования выступает пилотный поточный кислородный газификатор неторрефицированной (сырой) биомассы под атмосферным давлением МНН 2 т/сут [1].

Исследование проводилось с помощью метода вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics, CFD) в программе OpenFOAM с использованием подмодели турбулентности $k-\omega$ SST [2]. Расчеты выполнялись при холодной постановке задачи. Максимальный возраст частиц (время их пребывания в установке) задавался равным 10 с, что несколько больше, чем их время пиролиза (4 – 8 с). Результаты расчёта с характерными размерами частиц приведены на рис. 1.

*Н.А. Абаимов, n.a.abaimov@urfu.ru

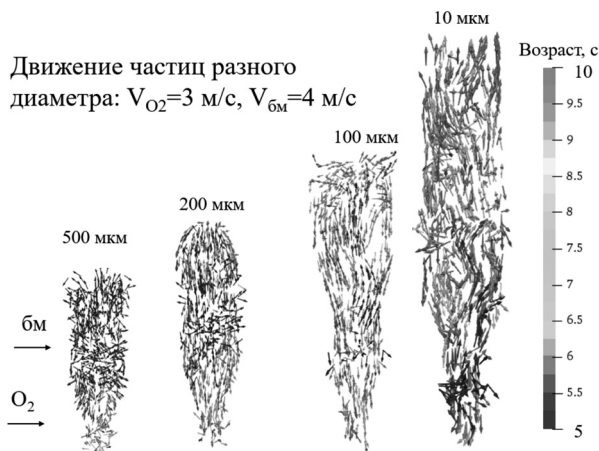


Рис. 1. Результаты расчёта с характерными размерами частиц

Небольшая площадь живого сечения в нижней части повышает скорость газа, который удерживает крупные частицы (500 мкм), не давая им проваливаться в шлакоотводчик. Большая площадь живого сечения в верхней части понижает скорость газа, но позволяет частицам коксо-зольного остатка (конвертированной биомассы, 10 мкм) покидать установку.

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. Mori R., Oki Y., Takeno K., Matsumoto K., Kobayashi Y., Ishii H. Production of Alternative Fuel Using Biomass Gasification Technology // Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review. 2008. V. 45. № 1. P. 67 – 69.
2. Abaimov N.A., Rizhkov A.F. Turbulence models verification for numerical simulation of the cyclone chamber // Proc. of 5th Int. Conf. HMTHSF. 2015. P. 429 – 437.

V.A. Kiryanov, N.A. Abaimov, A.F. Ryzhkov

Ural Federal University,
Russia, 620002 Ekaterinburg, Mira, 19

NUMERICAL STUDY OF MOTION OF BIOMASS PARTICLES IN ENTRAINED-FLOW GASIFIER

А.А. Саламатин^{1,2}, А.С. Халиуллина²

¹ ИММ – обособленное структурное подразделение ФИЦ КазНЦ РАН, 420111, г. Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31*

² Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18

МАССОПЕРЕНОС ДВУХКОМПОНЕНТНОГО ЭКСТРАКТА В УСЛОВИЯХ СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ ФЛОИДНОЙ ЭКСТРАКЦИИ

Сверхкритическая флюидная экстракция (СФЭ) масла из растительного сырья – технологический процесс получения натуральных масел, основанный на применении экологически чистого растворителя – CO_2 в сверхкритическом состоянии. Во время СФЭ навеска измельченных семян высокомасличного сырья помещается в аппарат цилиндрической формы, где образует пористый стационарный зернистый слой. Далее через зернистый слой фильтруется растворитель при температуре и давлении, которые отвечают сверхкритическому состоянию. В результате экстрагент (флюид) пропитывает сырье и растворяет в себе масло. По транспортным каналам в сырье (клеточные стенки и межклеточное пространство) масло диффундирует к поверхности частиц и конвективно выносятся к выходному сечению аппарата.

Получаемое таким образом масло существенно многокомпонентное. Состав экстракта, а также наблюдаемая динамика процесса изменяются с развитием СФЭ. Известные в литературе модели, описывающие динамику растворения и массопереноса масла на уровне индивидуальной частицы сырья, традиционно рассматривают экстракт в однокомпонентном приближении. Такое ограничение не позволяет учесть многие термодинамические эффекты, обусловленные многокомпонентностью экстракта.

В данной работе сформулирована математическая модель СФЭ из молотых семян высокомасличного сырья в масштабах индивидуальной частицы. Экстрагируемые соединения рассматриваются в двухкомпонентном приближении. Третий компонент в системе – растворитель. Химические потенциалы отдельных компонент в растворе получены в рамках подхода регулярных растворов с учетом парных взаимодействий. Выражения для массовых (диффузионных) потоков компонент получены на основе подхода Максвелла-Стефана. Подход позволяет учесть зависимость коэффициента диффузии

*А.А. Саламатин, arthur.salamatin2@gmail.com

компонент экстракта от локального состава раствора и размеров молекул. Таким образом, существенно расширяется спектр эффектов, которые возможно описать и предсказать (в сравнении с классическим подходом Фика).

Показано, что компоненты масла могут играть друг для друга как роль соразтворителя, таким образом, повышая интенсивность экстракции, так и антирастворителя, что приводит к замедлению динамики процесса. В завершение доклада рассматривается ситуация, в которой фильтрующий растворитель оказывается перенасыщенным, и в поровом пространстве зернистого слоя выделяется отдельная фаза масла. Возможность такого режима экстракции не обсуждается в литературе, посвященной СФЭ, и, как правило, не может быть проинтерпретирована в рамках известных моделей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект № 22-71-00080.

A.A. Salamatin¹, A.S. Khaliullina²

¹ IME - Subdivision of FIC KazanSC of RAS,
Russia 420111 Kazan, Lobachevskii str, 2/31

² Kazan Federal University,
Russia, 420008 Kazan, Kremlyovskaya str, 18

MASS TRANSFER OF TWO-COMPONENT SOLUTE AT SUPERCRITICAL FLUID EXTRACTION

С.М. Юдин^{1,2}, К.С. Ковешников^{1,2}, Ю.П. Ивочкин¹

¹ Объединенный институт высоких температур РАН,
125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13

² НИУ Московский Энергетический Институт,
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВНУТРИ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ИХ ФРАГМЕНТАЦИИ

Процесс фрагментации горячих жидкометаллических капель играет определяющую роль при паровых взрывах. Кроме того, взрывное дробление расплавов позволяет получать материалы аморфной структуры. Механизм дробления горячих капель при попадании в воду изучен недостаточно полно, о чем свидетельствует разнообразных различных гипотез, посвященных описанию этого явления. Подобное положение дел, отчасти, обусловлено отсутствием достоверных экспериментальных и расчетных данных, связанных с описанием процессов, протекающих внутри дробящихся капель.

В докладе представлены результаты исследования двух вопросов, посвящённых: 1) определению полей температуры и звукового давления при импульсном воздействии, вызванного коллапсом парового пузыря около расплавленной капли; 2) измерению осциллограмм температуры внутри плавающего образца (материал: олово, свинец, алюминий, латунь, медь, сталь) при его дроблении при индукционном нагреве.

Первая задача исследовалась численным методом с использованием программного продукта COMSOL Multiphysics. Для отслеживания распространения волнового фронта и получения оценочных значений внутреннего акустического давления была построена модель, в которой расчетная область представляла собой сферическую область, заполненную жидким металлом. На поверхности шара генерировались либо одиночный, либо пакет импульсов вида:

$$p(t) = \begin{cases} p_0 e^{-\frac{\pi^2(t-t_0)^2}{t_0^2}} & , \quad t \in [0, t_0], \\ 0 & t > t_0 \end{cases}$$

где t_0 – длительность импульса составляла 3 мкс, а p_0 – амплитуда давления равнялась 10 атм.

Для описания эволюции волнового фронта использовалось уравнение вида:

$$\frac{1}{\rho c^2} \frac{\partial p}{\partial t^2} + \nabla \left(-\frac{1}{\rho} \nabla p \right) = S(x, t),$$

где $S(x, t)$ – функция, описывающая давление, создаваемое монопольным источником сферических волн, как аналога импульса от схлопывания малого пузыря.

Экспериментальные данные (рис. 1 а, б) дают возможность оценить вероятность возникновения кавитации при внутри при текущих отрицательных давлениях и, как итог, возможность дробления капли.

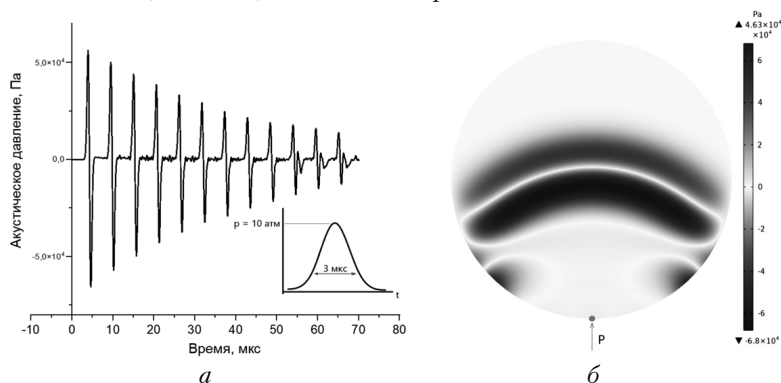


Рис. 1. Акустическое давление в центре капли (ниже вставка с внешним начальным импульсом) (а); мгновенный вид распространения ударной акустической волны (б)

Второй частью задачи является определение температуры внутри исследуемого образца в процессе фрагментации. Экспериментальные осциллограммы температуры позволяют лучше понять особенности внутренних явлений, например определить характерную частоту электровихревого течения, в момент фрагментации. Более детальная трактовка полученных экспериментальных и численных результатов – цель дальнейших исследований.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ № 075-01129-23-00 и частично при финансовой поддержке РФФ (проект №23-29-00911).

S.M. Yudin^{1,2}, K.S. Koveshnikov^{1,2}, Y.P. Ivochkin¹

¹ Joint Institute of High Temperature,
Russia, 125412 Moscow, Izhorskaya 13, Bd.2

²NRU Moscow Power Engineering Institute
111250 Russia, Moscow, Krasnokazarmennaya 14

THE STUDY OF PROCESSES INSIDE LIQUID METAL SAMPLES DURING THEIR FRAGMENTATION

Д.Ю. Балакин¹, К.Э. Аронсон¹

¹ Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19

МЕТОД ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОХЛАДИТЕЛЯ ЭЖЕКТОРА ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ

Охладитель многоступенчатого пароструйного эжектора представляет собой поверхностный теплообменный аппарат, в котором происходит конденсация паровоздушной смеси (ПВС). Эффективность функционирования охладителя перед ступенью эжектора определяет не только давление на входе в ступень, но и производительность эжектора в целом. Эффективность охладителя ступени эжектора определяется количеством сконденсированного в нем пара, которое в свою очередь существенно зависит от количества воздуха в ПВС [1].

Авторами предлагается использовать для расчета количества сконденсированного пара в охладителе 1 ступени эжектора предельный массовый коэффициент инжекции [2]:

$$U_{np} = \frac{G_{см}}{G_p} = \left(\mu \frac{f_3}{f_{p*}} - \frac{f_{p1}}{f_{p*}} \right) \frac{p_n k_n \Pi_n a_{p*}}{p_p k_p \Pi_{p*} a_{n*}}.$$

Полагая, что вторая ступень эжектора работает на предельном режиме т.е. объемная произвольность ступени относительно состава поступающей на её вход смеси постоянна, рассчитывается объёмная производительность при расходе воздуха равном нулю (расход пара через сопло известен).

Таким образом, зная геометрию струйного аппарата ступени, давление ПВС на входе в ступень, а также параметры рабочего пара, подводимого к соплу, и расходы впускаемого воздуха в эжектор, можно определить количество несконденсированного рабочего пара в охладителе перед ступенью эжектора, т.е. оценить эффективность функционирования охладителя.

Такой расчет был проведен с использованием данных натурных испытаний 3-ступенчатых эжекторов ЭП-3-80 и ЭП-3-2. На рисунке 1 изображена зависимость расхода поступающего на вход ступени эжектора пара G_n от количества воздуха в ПВС G_b . В случае с ЭП-3-80 (кривая 1) воздух практически не влияет на процесс конденсации вплоть до »60% по отношению к расходу пара, в то время как у ЭП-3-2 влияние воздуха становится существенным только при 200% по отношению к расходу пара. Также стоит

отметить, что при отсутствии воздуха охладитель первой ступени ЭП-3-2 оставляет несконденсированным лишь 40 кг пара, в то время как у охладителя ЭП-3-80 количество несконденсированного пара больше в 3 раза. При этом количество поступающего пара было одинаковым (как и площади поверхностей охладителей).

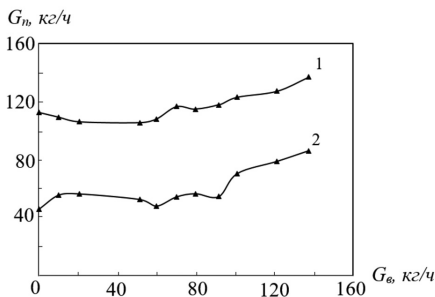


Рис. 1. Влияние воздуха на эффективность охладителя:
1 — ЭП-3-80;
2 — ЭП-3-2.

Принимая во внимание полученные результаты, справедливо отметить, что конденсация ПВС в охладителе эжектора определяется не только процессом массообмена, но также и газодинамикой аппарата, которая влияет на порог нечувствительности охладителя к количеству воздуха в смеси. Исходя из вышесказанного рекомендуется разрабатывать охладители с большей длиной пути паровоздушной смеси в аппарате. При этом необходимо учитывать увеличение сопротивления теплообменника.

В настоящее время ведется подготовка к проведению испытаний эжектора ЭП-3-120 на Сургутской ГРЭС-1, который оснащен расширенной системой измерений. В ходе испытаний планируется измерять количество сконденсированного в охладителях эжектора пара как в зависимости от расхода воздуха, так и от параметров пара перед соплами.

Список литературы

1. Расчет поверхностных теплообменных аппаратов для конденсации пара из паровоздушной смеси / Л.Д. Берман, С.Н. Фукс // Теплоэнергетика. 1959. № 7. С. 74 – 84.
2. Соколов Е.Я. Струйные аппараты / Е.Я. Соколов, Н.М. Зингер // М.: Энергоатомиздат, 1989. 352 с.

D.Y. Balakin¹, K. E. Aronson¹

¹ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Russia, Ekaterinburg, Mira street, 19

THE EFFICIENCY ASSESSING METHOD OF THE EJECTOR'S COOLER FUNCTIONING OF A STEAM TURBINE

В.С. Озерных¹, Г.Л. Лосев¹, И.В. Колесниченко¹, Е. Гольбрайх²

¹ Институт механики сплошных сред УрО РАН,
614068, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1^{1*}

² Университет им. Бен Гуриона, Беер-Шева, Израиль

РАЗВИТИЕ ВИХРЕВОГО ТЕЧЕНИЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИЛ

В металлургической и атомной промышленности имеют большое распространение кондукционные датчики и расходомеры [1, 2], применяемые для измерения скорости жидких металлов, в частности, скорости (расхода) теплоносителя на АЭС. Их главным преимуществом является простота реализации и широкие возможности измерения локальных характеристик пульсирующей скорости [3].

В работе рассматриваются два индуктора, создающие разнонаправленное вращающееся магнитное поле в цилиндрической ячейке жидкого металла. Особое внимание уделяется стадии разгона вихревого течения (т.н. спинап). На этой стадии происходит существенное изменение угловой скорости, приводящее жидкость через неустановившийся режим к конечному состоянию [4], которое характеризуется постоянной энергией течения. Распределение скорости в конечном состоянии может носить флуктуационный характер.

Время разгона существенно определяется величиной электромагнитной силы. При больших значениях электромагнитной силы просматривается наличие двух вихревой структуры, но течение очевидно становится неустойчивым, что характеризуется появлением полос на карте течения (Рис. 1). Причем, неустойчивость возникает достаточно быстро, буквально после первой секунды, и имеет вид не регулярных колебаний. Можно предположить, что образование тороидальных вихрей означает окончание фазы разгона.

Характеристика времени спинапа также получена из анализа эволюции кинетической энергии полоидальной, азимутальной и полной компонент скорости. На этих зависимостях достаточно легко проследить время полного формирования развитого течения. Для интенсивного силового воздействия это время около трех секунд. Энергетические зависимости также показывают гораздо большую интенсивность азимутального течения по сравнению с полоидальным. Линейный участок с небольшими возмущениями в расчетных данных на самом раннем этапе развития течения также воспроизводится и в экспериментальных данных.

*В.С. Озерных, ozernykh.v@icmm.ru

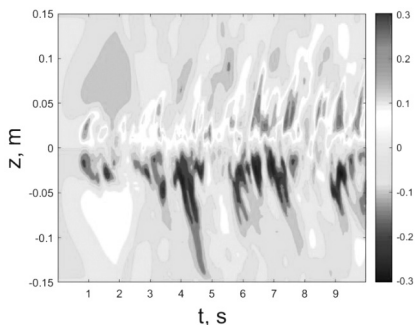


Рис. 1. Зависимость скорости V_z вдоль Z от времени. Расчеты при частоте тока питающего индуктора 50 Гц

Анализ карт давления помогает лучше понять топологию формирующегося течения. На начальном этапе формируются области пониженного давления как при малой, так и при большой интенсивности течения. Она обусловлена действием центробежных сил при вращающемся течении. Затем, что хорошо заметно именно при большой интенсивности течения, в центральной зоне между вихрями формируется зона повышенного давления, которая к тому же пульсирует. Частота этих пульсаций близка к частоте пульсаций скорости. Появление этой зоны повышенного давления скорее всего обусловлено динамическим давлением потока жидкого металла, который формируется от периферии к центру. Пульсации давления в этой центральной зоне приводят к пульсации скорости.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках научного проекта №С-26/564 «Разработка систем измерения расхода жидкого металла в каналах металлургических и ядерных энергетических установок».

Список литературы

1. Безопасность АЭС с реакторами на быстрых нейтронах / И. Кузнецов, В. Поплавский. М.: ИздАт, 2012. 632 с.
2. Техника работы с натрием на АЭС / В.М. Архипов. М. Энергоатомиздат, 1986. 136.
3. **Kolesnichenko I., Mamykin A., Golbraikh E., Pavlinov A.** Temperature correlation method application to the problem of measuring the flow rate of liquid sodium // *Magneto hydrodynamics*. 2021. Vol. 57. No. 4. P. 547 – 557.
4. *The Theory of Rotating Fluids* / P. Harvey. Greenspan. Cambridge: Cambridge University Press, England, 1968.

V.S. Ozernykh¹, G.L. Losev¹, I.V. Kolesnichenko¹, E. Golbraikh²

¹Institute of Continuous Media Mechanics, Russia 614068 Perm, Koroleva, 1

²Ben-Gurion University of the Negev, Israel, Beer Sheva

MHD VORTEX FLOW IN A CYLINDRICAL CHANNEL

А.Л. Демидов¹, А.Ю. Рябчиков¹, К.Э. Аронсон¹, Д.С. Гончаренко¹

¹ Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМЫ КОНДЕНСАТОР-ЭЖЕКТОР ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ПРИСОСАХ ВОЗДУХА

К числу факторов, оказывающих существенное влияние на эффективность выполнения конденсатором паровой турбины своей основной функции, относятся количество присасываемого воздуха и загрязнение трубок.

Присутствие воздуха в конденсаторе приводит к завоздушиванию части поверхности теплообмена. При номинальных присосах воздуха и расхода пара в конденсатор зона конденсации паровоздушной смеси занимает конструктивно выделенную зону воздухоотсоса. При изменении параметров поверхность зоны конденсации с повышенным содержанием воздуха в паре может существенно возрасти. В зависимости от параметров процесса (расход пара в конденсатор, температура циркуляционной воды) одно и то же количество присасываемого воздуха по-разному влияет на эффективность теплообмена с паровой стороны.

Для оценки влияния повышенных присосов воздуха на отклонение фактического давления пара в конденсаторе от нормативных значений по результатам натуральных исследований на конденсаторе КГ2-6200 паровой турбины Т-100/120-130 построена совместная характеристика конденсатор-эжектор [1]. Совместная характеристика конденсатора и эжектора, рис. 1, (зависимость температуры насыщения пара, t_k , от расхода пара в конденсатор) состоит из двух участков. Первый участок определяет характеристику конденсатора при больших расходах пара в конденсатор от D_k^1 до $D_k^{ном}$, где $D_k^{ном}$ — номинальный расход пара, $D_k^1 = (0,4 \dots 0,6) D_k^{ном}$. В этом диапазоне изменения D_k влияние эжектора при нормативных присосах воздуха на эффективность конденсатора не сказывается; температура пара и, соответственно, давление пара определяются по нормативной характеристике. Второй участок представляет собой совместную характеристику системы конденсатор-эжектор.

На рис. 1 линией 1 показана зависимость температуры насыщения пара в конденсаторе КГ2-6200 от расхода пара, построенная по нормативной характеристике конденсатора при температуре циркуляционной воды на входе $t_{чв}^1 = 25$ °С и нормативных присосах воздуха в часть низкого давления (ЧНД) ($G_b < 14,5$ кг/ч). Видно, что при расходе пара в конденсатор $D_k > 146$

т/ч и до $D_{\text{к}}^{\text{ном}}$, влияние характеристики эжектора на вакуум в конденсаторе не сказывается, а при $D_{\text{к}} < 146$ т/ч температура пара описывается совместной характеристикой конденсатор-эжектор.

Линией 2 показана зависимость температуры пара в конденсаторе от расхода пара, при расходе воздуха в ЧНД $G_{\text{в}} = 80$ кг/ч. При таких присосах отсутствие влияния эжектора на давление пара в конденсаторе наблюдается при $D_{\text{к}} > 173$ т/ч. Звездой на рис. 1 показано фактическое значение давления пара в конденсаторе соответствующее фактическому значению $t_{\text{к}}$. Как видно из рисунка, при нормативных присосах воздуха и удовлетворительном состоянии конденсатора температура пара соответствует давлению пара в конденсаторе $P_{\text{к}}^{\text{норм}} = 12,75$ кПа. В этом режиме давление в конденсаторе определяется нормативной характеристикой конденсатора.

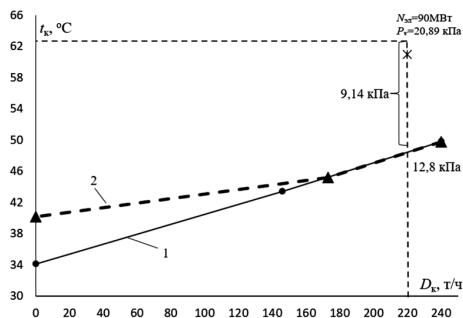


Рис. 1. Характеристика конденсатора и эжектора: 1 – при нормативных присосах воздуха и исправном конденсаторе; 2 – при присосах воздуха $G_{\text{в}} = 80$ кг/ч

Отклонение фактического давления пара в конденсаторе ($P_{\text{к}}^{\text{ф}}$) от нормативного ($\Delta P_{\text{к}} = P_{\text{к}}^{\text{ф}} - P_{\text{к}}^{\text{норм}} = 9,14$ кПа) может объясняться состоянием конденсатора, связанное с загрязнением трубок, состоянием трубного пучка, неравномерным распределением расхода пара между трубными пучками, что приводит к образованию застойных зон и не эффективному использованию поверхности теплообмена, и неравномерному отсосу воздуха из половин конденсаторов.

Список литературы

1. Шкловер Г.Г. Исследование и расчет конденсационных установок паровых турбин / Г.Г. Шкловер, О.О. Мильман. М.: Энергоатомиздат, 1985.

A.L. Demidov¹, A.Yu. Ryabchikov¹, K.E. Aronson¹, D.S. Goncharenko¹

¹ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Russia, Ekaterinburg, Mira street, 19

EFFICIENCY OF THE CONDENSER-EJECTOR SYSTEM WITH INCREASED AIR SUCTION

О.О. Мильман, А.Ю. Картуесова, В.С. Крылов
ЗАО «НПВП «Турбокон»,
248010, Россия, г. Калуга, Комсомольская роща, д. 43

МЕТОДИКА РАСЧЕТА И ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО КОНДЕНСАТОРА ПАРА ИЗ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ С БОЛЬШИМ СОДЕРЖАНИЕМ НЕКОНДЕНСИРУЮЩИХСЯ ГАЗОВ

Разработаны методика и программа расчета конденсатора пара из парогазовой смеси (ПГС) с сохранением ее скорости по глубине трубного пучка. При постоянной скорости ПГС по мере конденсации пара сохраняется высокая интенсивность теплообмена вследствие динамического воздействия потока, но одновременно происходит потеря давления, в результате чего температура насыщения пара в ПГС снижается.

Программа использована для расчета оптимальной скорости пара в конденсаторе с большим содержанием неконденсирующихся газов. При оптимизации учтено соотношение между интенсификацией теплообмена при увеличении скорости ПГС и снижением температуры насыщения пара в смеси из-за роста потерь давления.

В качестве целевой функции в работе был принят минимум площади поверхности теплообмена при заданной степени конденсации пара в трубном пучке.

Программа выполняет расчет теплосъема при конденсации пара на трубном пучке i -го ряда. Расход G , давление ПГС p и массовая концентрация НКГ m на входе в $i+1$ -й ряд определены условиями работы i -го ряда,

в частности $G_{i+1} = G_i - \Delta G_i$;

Температуру насыщения пара в смеси вычисляют при новых значениях давления p_{i+1} и концентрации НКГ m_{i+1} .

Для корректности сопоставления результатов расчета при прочих равных условиях принят определенный порядок вычислений.

Проведены расчеты при давлении 5 – 30 кПа на входе в трубный пучок, температуре охлаждающей воды на входе в конденсатор 12 – 30 °С, скорости воды в трубах 1 – 4 м/с, длине труб 4 – 12 м и концентрации неконденсирующихся газов (НКГ) на входе 1 – 20 % при расходе ПГС 1 кг/с. Выполнена оценка влияния отложений на поверхности труб на интенсивность теплообмена в процессе эксплуатации, а также влияния точности расчета коэффициента тепло-

передачи на результаты расчета оптимальной скорости. На рис. 1 показано влияние эксплуатационных фактов (термического сопротивления отложений на поверхности труб $R_{отл}$) на оптимальные скорости ПГС, которое не отличается от влияния скорости воды и может быть вызвано термическим сопротивлением отложений и теплоотдачей от стенки к воде. Влияние погрешности в определении коэффициента теплопередачи (рис. 2) демонстрирует слабую зависимость оптимальной скорости от этого фактора в пределах $\pm 20\%$ расчетного значения.

Получены зависимости площади поверхности теплообмена от скорости ПГС и зависимость оптимальной скорости ПГС от температуры и скорости охлаждающей воды, давления конденсации и других параметров. Оптимальное значение скорости ПГС лежит в области более 40 м/с, что необходимо учитывать при проектировании конденсаторов.

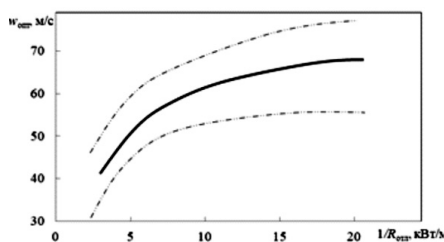


Рис. 1. Зависимость оптимальной скорости ПГС от $1/R_{отл}$

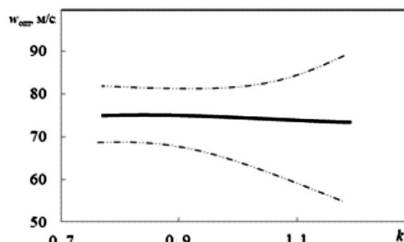


Рис. 2. Зависимость оптимальной скорости пара от заданной погрешности k при расчете коэффициента теплопередачи

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-19-01604 от 24.05.2017).

Список литературы

1. Мильман О.О., Никиточкин В.П. Компоновка трубного, пучка конденсатора пара // Теплоэнергетика. 1991. № 5. С. 56 – 60.
2. Высокоэффективный конденсатор пара из парогазовой смеси / О.О. Мильман, В.С. Крылов, А.В. Птахин, А.В. Кондратьев, Г.Г. Яньков // Теплоэнергетика. 2017. № 12. С. 16 – 26. <https://doi.org/10.1134/S0040363617120074>.

O.O. Milman, A.Yu. Kartuesova, V.S. Krylov, A.V. Ptakhin,

ZAО NPVP Turbocon, Kaluga, 248010 Russia

METHOD OF CALCULATION AND OPTIMIZATION OF A HIGHLY EFFICIENT STEAM CONDENSER PARAMETERS FROM A VAPOR-GAS MIXTURE WITH A HIGH CONTENT OF NON-CONDENSING GASES

*В.А. Рязанцев¹, А.Р. Забиров², В.В. Ягов¹, М.М. Виноградов¹,
И.А. Молотова¹*

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»

111250, ш. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14 *

² Объединенный институт высоких температур РАН

125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13

ЗАКАЛКА В ПОЛИМЕРНЫХ ЖИДКОСТЯХ

Нестационарное охлаждение высокотемпературных тел в жидкостях (закалка) – широко распространенное явление, наблюдаемое в большом количестве технологических процессов: металлургия и металлообработка, в атомной энергетике – поставарийный залив активной зоны ядерного реактора и паровой взрыв. Для достижения наилучшего результата необходимо, чтобы охлаждающая жидкость имела высокую скорость охлаждения в интервале температур перлитного превращения стали и низкой – в интервале температур мартенситного превращения. Такие охлаждающие жидкости, как вода или минеральное масло, не соответствуют этим условиям, поскольку охлаждение в воде протекает очень быстро, тем самым вызывая трещины и деформации в структуре металла, а масло имеет низкую интенсивность охлаждения в верхнем диапазоне температур и неприменимо для закалки углеродистых и низколегированных сталей. На сегодняшний день, большое количество промышленных компаний перестают использовать минеральные масла для процессов закалки и используют их аналоги. Как правило, это синтетические закалочные среды на основе полимерных соединений и органических веществ.

Основной задачей этой работы было сравнение процесса охлаждения в синтетической закалочной жидкости «Термовит-М» с минеральным маслом «Лукойл ассисто» Т16 и Т26 и дистиллированной водой.

В качестве опытного образца использовался шар из нержавеющей стали диаметром 40 мм, оснащенный одной центральной и тремя поверхностными термопарами, расположенными под разными радиальными углами (90, 135, 180°). Образец нагревался до заданной температуры (≈ 700 °С), после чего перемещался в охлаждающую жидкость с температурой 30 °С. Показания термопар транслировались на персональный ПК, где в интерактивном режиме строилась зависимость температуры от времени охлаждения, так называемая термограмма охлаждения.

*В.А. Рязанцев, zorro-001@yandex.ru

На рис. 1 представлены полученные кривые охлаждения образца в исследуемых жидкостях. Из термограммы видно, что во всех жидкостях, кроме воды, на поверхности образца последовательно сменяются пленочное кипение, пузырьковое кипение и свободная конвекция. В воде наблюдается лавинообразный спад паровой пленки и мгновенное охлаждение образца. Охлаждение в минеральном масле демонстрирует практически одновременный переход от пленочного к пузырьковому режиму кипения по поверхности шара. Время охлаждения до температуры насыщения (которая была принята достаточно условно за $T_s = 380^\circ\text{C}$) составляет приблизительно 15 сек. Процесс закалки в Термовите-М имеет более выраженный переход от пленочного режима кипения к пузырьковому, температура перехода для 1% раствора составила примерно 590°C , а весь процесс охлаждения занял порядка 20 сек, а для 2% – 520°C , время охлаждения свыше 50 сек.

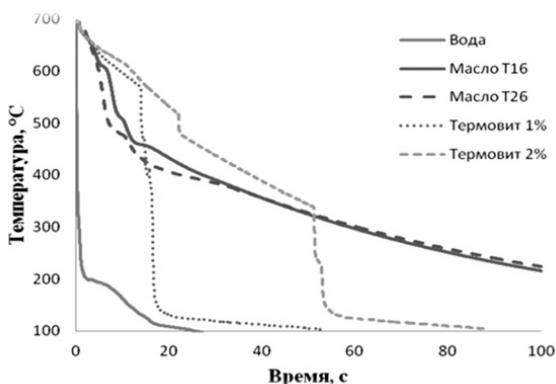


Рис. 1. Термограмма охлаждения нержавеющей сферы в воде – 1, минеральном масле – 2,3 и Термовите-М – 4,5

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ в рамках научного проекта № 20-79-10363.

*V.A. Ryazantsev¹, A.R. Zabirov², V.V. Yagov¹, M.M. Vinogradov¹,
I.A. Molotova¹*

¹ National Research University MPEI
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14 building 1*

² Joint Institute for High Temperatures RAS
125412, Moscow, Izhorskaya st., 13 building 2,

HARDENING IN POLYMER LIQUIDS

И.М. Молотов^{1,2,3}, А.И. Счастливец³

¹ ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности»
107140, г. Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, 5

² Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14

³ Объединенный институт высоких температур РАН,
111116, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 17А*

АВТОНОМНОЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ НА БАЗЕ ВИЭ С ВОДОРОДНЫМ АККУМУЛИРОВАНИЕМ ЭНЕРГИИ

Проблема энергоснабжения локальных объектов, удалённых от централизованной сети, характерна для стран с большой территорией и низкой плотностью населения. В этих условиях наиболее эффективным может стать распределенная генерация на базе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) с водородным аккумулярованием энергии [1, 2].

В работе представлена имитационная модель (ИМ) баланса мощности автономного электроснабжения на базе фотоэлектрической (ФЭ) генерацией в качестве основного источника энергии и накопителем энергии, состоящим из аккумуляторной батареи (АБ) и водородного накопителя энергии с хранением в виде сжатого газа. Для вторичной генерации электроэнергии внутри сети из запасенного водорода используется водородный топливный элемент (ТЭ).

ИМ предназначена для проектирования микроэлектростанции обеспечивающей автономное электроснабжение объектов, находящихся за границей охвата централизованной сети.

Работа объекта моделирования организована следующим образом (рисунок 1): избыточной электроэнергией от солнечных батарей (1) посредством многофункционального инвертора (2) заряжается АБ (3), которая обеспечивает сглаживание неравномерностей генерации в краткосрочный интервал времени; когда АБ заряжены, электролизер (4) также за счет избыточной электроэнергии методом электролиза воды нарабатывает водород, который накапливается в ресивере (5) и, затем, сжимается водородным компрессором (6) в баллоны (7) – хранилище водорода для долгосрочного хранения запасенной энергии в виде сжатого газа; накопленный резерв используется в период высокой сезонной облачности для вторичной выработки электроэнергии водородным ТЭ (8).

*И.М. Молотов, i@roznin.ru

Моделирование осуществляется в Simulink на базе Matlab с использованием междисциплинарной библиотеки мультифизического моделирования Simscape, которая позволяет выполнять численные расчеты в сосредоточенных параметрах по принципиальной схеме установки на основе законов сохранения и дифференциальных уравнений.

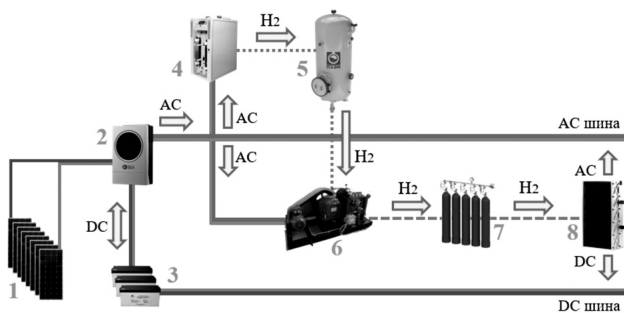


Рис. 1. Архитектура проектируемой автономной микроэлектростанции

В работе представлен баланс электрической мощности, коэффициент используемой мощности, температура и давление водорода в хранилище, а также проводится анализ результатов моделирования в течение календарного года.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ №22-29-00927.

Список литературы

1. **Ermolenko B.V. et al.** Wind and solar PV technical potentials: Measurement methodology and assessments for Russia // *Energy*. 2017. Т. 137. С. 1001 – 1012.
2. **Dunikov D.O.** Russia's view on development of novel and renewable energy sources, including hydrogen energy // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015. Т. 4. №. 40. С. 2062 – 2063.

I.M. Molotov^{1,2,3}, A.I. Schastlivtsev³

¹ Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Russia, 107140, Moscow, Malaya Krasnoselskaya, 2/8, 5

² National Research University "MPEI", Russia, 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya, 14

³ Joint Institute of High Temperature, Russia, 111116, Moscow, Krasnokazarmennaya, 17A

STAND-ALONE ENERGY SUPPLY BASED ON RENEWABLE ENERGY SOURCES WITH HYDROGEN ENERGY STORAGE

СЕКЦИЯ 7

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПРОМЫШЛЕННЫХ И ЛАБОРАТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ТЕКУЧИХ СРЕД (КРУГЛЫЙ СТОЛ)

А.А. Валеев, Н.С. Душин, О.А. Душина, С.А. Колчин

Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ КазНЦ РАН,
420011, г. Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31

ВЫРАВНИВАНИЕ ПРОФИЛЯ СКОРОСТИ В ТЕЧЕНИЯХ С ПУЛЬСАЦИЯМИ ДАВЛЕНИЯ

Сложная пространственная конфигурация трубопроводных систем, наличие ответвлений, регулирующих устройств и задвижек на трубопроводах и газораспределительных станциях нарушает однородность и симметрию профиля скорости, вызывает закрутку течения, генерирует акустические возмущения и создает условия для их усиления. Оценить и учесть все эти воздействия в расходомерах почти невозможно, поэтому неопределенность измерений расхода при сложных условиях течения может достигать 20%. Наиболее рациональным способом повышения точности измерений в таких условиях является использование кондиционеров потока. Их функция состоит в формировании потока с известными характеристиками. Однако существующие модели кондиционеров в основном разработаны для борьбы с ограниченным набором гидродинамических предысторий течения и, как правило, требуют совместной градуировки с конкретным расходомером. Кондиционеры потока, работающие в широком спектре предысторий течения и способные снижать влияние акустики на точность измерений, практически не разрабатывались. Напротив, есть данные, показывающие, что кондиционер потока с поперечным перфорированным диском может сам являться источником акустического шума.

В работе предлагается новый подход к профилированию проточной части кондиционеров потока. Выполнена серия гидродинамических и акустических экспериментов по измерению характеристик турбулентности и оценке затухания акустического шума в кондиционере потока. Рассматривалось 10 конфигураций трубопровода в сочетании с пульсациями расхода. Для каждой измерительной плоскости были выполнены измерения на 19 частотах и трех амплитудах пульсаций расхода.

Для измерения гидродинамических характеристик потока использовался двумерный оптический метод Smoke Image Velocimetry (SIV). Число Рейнольдса варьировалось от 2300 до 30000. Акустические эксперименты в диапазоне частот от 5 Гц до 20 кГц выполнялись с использованием динамиков, воспроизводивших белый шум, и акустической аппаратуры Bruel&Kjaer с измерительными микрофонами.

Обобщение полученных экспериментальных данных показывает, что профили скорости на выходе из кондиционера потока можно разделить на две группы по признаку согласования формы и значений при варьировании конфигурации предвключенного участка. К первой группе относятся трубопроводы с изгибами и трубопровод с боковым отводом. Вторая группа объединяет трубопроводы различных конфигураций, имеющие на входе клиновую задвижку. В обеих группах профили близки к типичной для развитого турбулентного течения форме, однако на периферии ядра потока имеются области ускорения течения.

Установлено хорошее согласование профилей скорости и пульсаций скорости, полученных во взаимно перпендикулярных плоскостях. Это демонстрирует возможности рассматриваемого кондиционера по нивелированию закрутки потока и показывает, что турбулентность в следе за кондиционером потока можно считать изотропной с типичной для турбулентных течений амплитудой пульсаций скорости.

Амплитудный спектр продольных пульсаций скорости на стационарных режимах в целом согласуется с установившимися представлениями. Спектры, полученные на нестационарных режимах, показывают, что кондиционер хорошо справляется с подавлением широкого диапазона частот наложенных пульсаций скорости.

Акустическими измерениями установлено, что кондиционер потока имеет наибольшую эффективность в диапазоне частот от 10 до 15 кГц. Среднее значение коэффициента глушения шума в этой полосе частот порядка 6 (15,6 Дб), а наибольшее значение доходит до 15 (23,5 Дб). Дополнительно в работе был определен средний коэффициент глушения шума в диапазоне частот 30...140 кГц. Он равен 4,1 (порядка 12 Дб). Данный результат имеет большую практическую значимость для ультразвуковой газовой расходомерии, т.к. рассмотренный диапазон частот покрывает область частот с наибольшей чувствительностью используемых в ультразвуковых расходомерах пьезоэлектрических преобразователей.

A.A. Valeev, N.S. Dushin, O.A. Dushina, S.A. Kolchin

Institute of Power Engineering and Advanced Technologies, FRC KazSC RAS,
Russia 420011 Kazan, Lobachevskogo, 2/31

CONDITIONING OF VELOCITY PROFILES IN FLOWS WITH PRESSURE PULSATION

Э.Р. Зайнуллина, В.Ю. Митяков

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

МОНИТОРИНГ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ВОДЯНОГО ПАРА НА ПЛАСТИНЕ

Экспериментально подтверждена применимость гетерогенных градиентных датчиков теплового (ГДТП) к изучению теплообмена при конденсации [1-2].

В работе предлагается осуществить мониторинг теплообмена при конденсации, основанный на совмещении градиентной теплотометрии, термометрии и визуализации течения.

Экспериментальная модель представляет собой диск из нержавеющей стали диаметром 150 мм и толщиной 0,75 мм, имеющий с тыльной стороны коробчатую конструкцию для подвода и отвода охлаждающей воды. Подвод пара обеспечивается парогенератором.

В центре теплообменной поверхности установлен ГДТП из композиции медь-никель размерами $10 \times 15 \times 0,2$ мм, который подключен по «трехпроводной схеме»: к ГДТП приварены два медных и один алюмельовый провод; подключение измерительного прибора к паре проводов медь-медь обеспечивает измерение плотности теплового потока, а к паре медь-алюмель – температуры в зоне установки датчика. Одновременно с записью сигнала ГДТП выполнялась видеозапись течения конденсата на пластине, раскадровка которой позволила сопоставлять изменения в мгновенной плотности теплового потока с движением конденсата.

На рис. 1, *a* приведена временная теплограмма, полученная при конденсации водяного пара на поверхности вертикального диска. По плотности теплового потока на кривой можно выделить три этапа: на первом (I) $\bar{q} = 3,2$ кВт/м², на втором (II) – $\bar{q} = 9,6$ кВт/м², третий (III) – $\bar{q} = 31,2$ кВт/м². На рис. 1, *б* и в приведены результаты раскадровки видеозаписи.

Совместный анализ теплограммы и картин течения позволил объяснить изменения в среднем уровне и пульсациях плотности теплового потока. Установлено, что при стекании конденсата в виде ручейков плотность теплового потока может резко увеличиваться: от 14 до 53 кВт/м² за 2 с. Уменьшение плотности теплового потока объясняется скоплением конденсата на поверхности ГДТП.

$q, \text{кВт/м}^2$

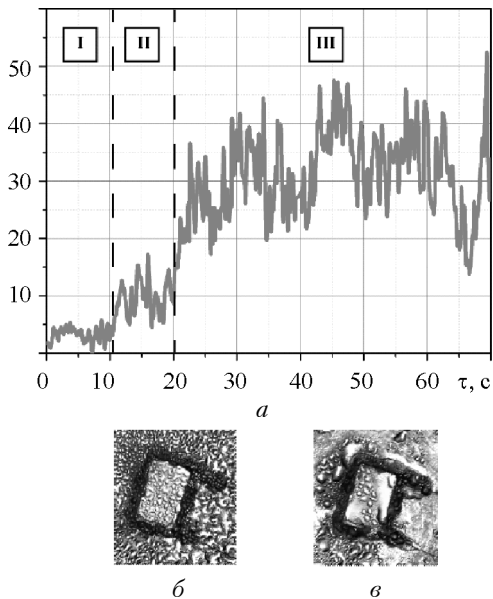


Рис. 1. Конденсация насыщенного водяного пара на пластине:
а – временная теплогрaмма;
б и *в* – фотографии течения в моменты времени $\tau = 19$ с и 43 с соответственно

Дальнейшее развитие предлагаемого подхода позволит вести мониторинг конденсации без визуализации, только по данным теплотометрии, что актуально для действующих теплоотводящих установок.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (соглашение № 22-29-00152).

Список литературы

1. Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Y., Zainullina E.R. et al. An investigation into film condensation of saturated steam on tube surfaces by a gradient heatmetry // Therm. Eng. 2021. Vol. 68. No. 10. Pp. 794 – 801.
2. Zainullina E.R. and Mityakov V.Yu. Heat Transfer Investigation during Condensation on the Horizontal Pipe // Inventions. 2023. 8, 2

E.R. Zainullina, V.Yu. Mityakov

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University,
Russia, 195251, St.Petersburg, Polytekhnicheskaya, 29

HEAT TRANSFER MONITORING DURING WATER STEAM CONDENSATION ON THE PLATE

Н.И. Логинов, Д.С. Брагин, Т.Н. Верещагина

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского»,
249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1*

НАСОС-РАСХОДОМЕР ДЛЯ ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ

В циркуляционных контурах с жидкими металлами для осуществления прокачки теплоносителя используются магнитогидродинамические (МГД) насосы, а для измерения расхода МГД расходомеры. В расходомерах, предназначенных для измерения расхода жидких металлов, чаще всего используют постоянное магнитное поле, создаваемое постоянными магнитами. Такие расходомеры называют кондукционными, или просто магнитными расходомерами.

В Физико-энергетическом институте был предложен способ измерения расхода с помощью электромагнитного насоса, защищённый патентом на изобретение [1] и устройства для его осуществления, защищённые патентами на полезную модель [2] и изобретение [3]. Таким образом, появилось магнитогидродинамическое устройство – насос-расходомер, выполняющее одновременно две функции: осуществление прокачки теплоносителя и измерение его расхода. Это позволило сократить количество оборудования и уменьшить размеры различных установок с жидкими металлами.

В настоящем докладе рассматриваются магнитогидродинамические устройства для установок с малыми (до 500 л/ч) и сверхмалыми (10 см³/ч – 10 л/ч) расходами жидких металлов. Такие расходы имеют место, например, в циркуляционных контурах пробковых индикаторов примесей в щелочных металлах, электрохимических датчиков кислорода и водорода, пробоотборников-дистилляторов и др.

Принцип работы кондукционного расходомера основан на законе Фарадея: при движении проводника (жидкого металла) в магнитном поле в проводнике индуцируется электродвижущая сила (эдс) $E = B \cdot W \cdot L$, где W – скорость движения проводника.

Принцип работы кондукционного насоса основан на законе Ампера: при пропускании электрического тока через находящийся в магнитном поле проводник (жидкий металл), на него действует сила $F = B \cdot I \cdot L$, где B – магнитная индукция, I – сила тока, L – длина проводника (рабочего канала).

*Д.С. Брагин, dsbragin@ippe.ru

Особенность измерения расхода с помощью насоса-расходомера состоит в том, что на выходной сигнал расходомера накладывается падение напряжения от тока питания насоса на омическом сопротивлении рабочего канала. Это падение напряжения необходимо вычесть из выходного сигнала расходомера.

В докладе описан способ измерения расхода, приведен один из вариантов исполнения насоса-расходомера и результаты его испытаний. Приведены характеристики насоса: напорная и рабочая. Также приведена градуировочная зависимость для определения расхода с помощью насоса-расходомера. Показано, что выходной сигнал достаточно большой и линейно зависит от расхода жидкого металла, как и у традиционных магнитных расходомеров.

Четыре таких насоса-расходомера были использованы при стендовых испытаниях индикатора водорода и электрохимических датчиков кислорода и водорода в натрии.

В настоящее время в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» разработаны и испытаны несколько вариантов исполнения насоса-расходомера с различными характеристиками, предназначенные для малых циркуляционных контуров с натрием и эвтектическим сплавом натрий-калий.

Совмещение в одном устройстве двух функций при сохранении размеров одного из них, позволяет снизить не только массо-габаритные характеристики, но и стоимость систем с жидкометаллическим охлаждением. Однако, для широкого практического использования насосов-расходомеров, особенно в ЯЭУ, требуется утвердить этот новый тип средства измерения расхода.

Список литературы

1. **Логинов Н.И.** Способ измерения расхода жидкого металла через проточную часть циркуляционного контура. Патент РФ на изобретение № 2490597. 20.08.2013. Бюл. № 28.
2. **Аксёнов Ю.В., Логинов Н.И. и др.** Устройство для измерения расхода жидкого металла на основе электромагнитного насоса. Патент РФ на полезную модель № 133289. 10.10.2013. Бюл. № 23.
3. **Логинов Н.И.** Кондукционный насос-расходомер. Патент РФ на изобретение №2714504. 18.02.2020 Бюл. № 5.

N.I. Loginov, D.S. Bragin, T.N. Vereschagina

State Scientific Centre of the Russian Federation – Leipunsky Institute for Physics
and Power Engineering,
249033, Obninsk, Bondarenko, 1

PUMP-FLOUMETER FOR LIQUID METALS

О.В. Митрофанова^{1,2}, И.Г. Поздеева^{1,2}, Н.А. Старовойтов¹

¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
115409, г. Москва, Каширское ш., д. 31*

² Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ВИХРЕВОЙ СТРУКТУРЫ ИМПАКТНОГО ЗАКРУЧЕННОГО ТЕЧЕНИЯ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Исследование генерации акустических колебаний устойчивыми вихревыми структурами имеет важное значение для совершенствования перспективных ядерных энергетических установок.

В работе проводилась визуализация тонкой вихревой структуры импактного закрученного течения, описанного в работе [1], в которой представлено описание экспериментального стенда и вихревой камеры. Рабочим участком экспериментального стенда являлась вихревая камера, в нижнюю часть которой по тангенциальному подводу нагнетался компрессором осушенный воздух. Верхней торцевой поверхностью камеры являлась крышка из плексигласа с центральным отверстием диаметром 6 мм. Незакрепленная преграда в виде круглого диска, так же выполненного из плексигласа, могла свободно вращаться и перемещаться вдоль вертикальной оси.

Как было показано в работе [1], при истечении воздуха через щель между крышкой и преградой в условиях кризиса закрученного потока, фиксируемого по предельной величине расхода, формируется «тонкая» спирально-вихревая структура. Этому явлению соответствует спектр акустических колебаний в области звукового диапазона.

Визуализация вихревой структуры в данной работе проводилась посредством нанесения на поверхность преграды слоя вязкой суспензии с добавлением оксида титана. Расход воздуха доводился до значения, при котором в отсутствие краски фиксировались резонансные акустические колебания. Особую важность при обработке полученных данных имели визуализационные картины течения на поверхности крышки вихревой камеры, пример которых представлен на рис. 1. Перед началом эксперимента на всю нижнюю поверхность преграды и крышку вихревой камеры по диаметру кромки преграды наносился тонкий слой визуализирующей суспензии. Как показывает рис. 1, при подаче воздуха в вихревую камеру и доведении расхода до критического значения в области истечения закрученного потока

Н.А. Старовойтов, starovoitovnik@yandex.ru

из-под преграды были зафиксированы спирально-вихревые структуры, направления движения в которых имели разную радиальную направленность: от выходного отверстия (истечение вонне из-под преграды) и к нему (к центру под преградой). Вихревые структуры, сформированные возвратным течением, выделены овальным фрагментом (а) на рис. 1. Полученная визуализационная картина подтверждает вывод, сделанный в работе [1] о вовлечении внешней среды в область пониженного давления под преградой.

В результате проведенных экспериментов были выявлены размеры тонкой вихревой структуры потока: поперечный размер спиральных вихрей, выходящих из-под преграды составлял 0,26 мм, шаг закрутки в одиночных спиральных вихрях варьировался в пределах 0,63-2,38 мм. Цифрами 1-9 на рис. 1 отмечены пары следов, оставленных вихрями с противоположным направлением закрутки. На фрагменте (б) рис. 1 показано слияние отдельных спиральных вихрей в один, выносящий долю расхода.

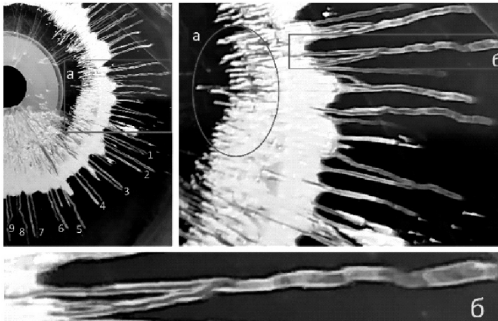


Рис. 1. Визуализация вихревой структуры импактного закрученного течения на поверхности крышки вихревой камеры с увеличением отдельных фрагментов

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда: грант РФФ № 23-29-00373, <http://rscf.ru/project/23-29-00373/>.

Список литературы

1. Поздеева И.Г. Исследование гидродинамики и механизмов генерации акустических колебаний в сложных вихревых течениях. Дис. ... канд. техн. наук. М.: НИЯУМИФИ-2019-117 с.

O.V. Mitrofanova^{1,2}, I.G. Pozdeeva^{1,2}, N.A. Starovoytov¹

¹NationalResearchNuclearUniversityMEPhI, Russia, 115409 Moscow, Kashirskoesk 31

²National Research Center «Kurchatov Institute»,

Russia, 123182 Moscow, AkademikaKurchatova pl., 1

VISUALIZATION OF THE VORTEX STRUCTURE OF IMPACT SWIRLING FLOW UNDER EXCITATION OF ACOUSTIC OSCILLATIONS

К.С. Егоров^{1,2}, И.А. Загайнов^{1,2}, С.С. Попович¹

¹ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
105005, г. Москва, 2-я Бауманская, д. 5

² НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова,
119192, г. Москва, Мичуринский проспект, д. 1*

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ТРАССЕРОВ ЗАСЕВА ПОТОКА СИСТЕМЫ PIV ПРИ СВЕРХЗВУКОВЫХ СКОРОСТЯХ

Панорамные (полевые) методы измерений, в отличие от традиционных (термоанемометр, лазерная доплеровская анемометрия и др.), обладают рядом преимуществ. Например, они позволяют измерять мгновенные распределения физических величин, выявлять в потоке когерентные структуры, исследовать нестационарные потоки и быстропротекающие процессы [1]. Наиболее известным среди панорамных методов является анемометрия по изображениям частиц PIV (Particle Image Velocimetry).

Представлены результаты экспериментальной отработки метода анемометрии по изображениям частиц. В рамках работы произведена отладка 2D2C-PIV (двумерной двухкомпонентной) системы производства «Сигма Про» на базе сверхзвуковой аэродинамической установки AP-2 [2]. Число Маха набегающего потока составило 3.0, число Рейнольдса на срезе сопла – $Re(x) > 2 \cdot 10^7$. Произведены измерения распределения скорости потока в центральной части и на стенке рабочего канала с различными видами трассеров: частицами DEHS через генератор аэрозоля Ласкина, жидким углекислым газом и дистиллированной водой, подаваемой через форсунки мелкодисперсного распыла в форкамере установки.

Наилучшее качество засева было получено при использовании жидкости DEHS. Засев углекислым газом приводил к туманообразованию в сверхзвуковой области с неравномерным распределением частиц по сечению и, по видимому, слишком малому (меньше 1 мкм) размеру формируемых частиц для последующей корректной обработки полученных изображений. Капли дистиллированной воды, формируемые форсунками, оказались напротив слишком крупными (десятки микрометров), чтобы можно было утверждать установление динамического равновесия с несущим потоком.

* И.А. Загайнов, iz1721@mail.ru

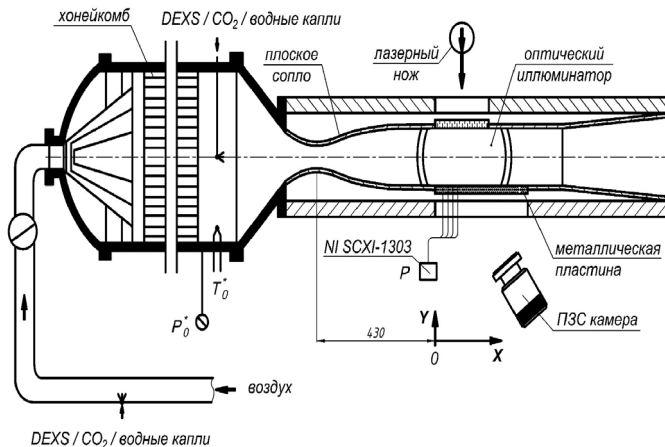


Рис. 1. Схема проведения экспериментального исследования:
 T_0^* – полная температура набегающего потока, К;
 P_0^* – полное давление, Па; P – статическое давление на стенке, Па

Работа выполняется в рамках государственной темы АААА-А19-119012990115-5 НИИ механики МГУ.

Список литературы

1. Бильский А.В., Гобызов О.А., Маркович Д.М. История и тенденции развития метода анемометрии по изображениям частиц для аэродинамического эксперимента (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. 2020. Т. 27. № 1. С. 1 – 24.
2. Попович С.С. Особенности автоматизации эксперимента и обработки результатов при исследовании теплообмена в сверхзвуковом потоке сжимаемого газа // Программная инженерия. 2018. № 1. С. 35 – 45.

K.S. Egorov¹, I.A. Zagainov^{1,2}, S.S. Popovich²

¹ Bauman Moscow State Technical University,
 Russia 105005 Moscow, 2-nd Baumanskaya, 5

² Institute of Mechanics of Lomonosov Moscow State University,
 Russia, 119192, Moscow, Michurinsky pr., 1

**COMPARATIVE STUDY OF THE APPLICABILITY
 OF VARIOUS TYPES OF FLOW SEEDING TRACERS
 OF THE PIV SYSTEM AT SUPERSONIC VELOCITY**

В.Ю. Митяков, В.М. Проскурин, А.В. Бикмулин, А.В. Павлов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

СОЗДАНИЕ И ГРАДУИРОВКА ГЕТЕРОГЕННЫХ ГРАДИЕНТНЫХ ДАТЧИКОВ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ В ТОПКЕ КОТЛА ДКВР 10/13

В настоящее время в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого активно применяются датчики теплового потока собственного производства [1,2].

На сегодняшний день существуют 2 разновидности датчиков теплового потока: градиентные датчики теплового потока (ГДТП) и гетерогенные градиентные датчики теплового потока (ГГДТП).

ГДТП – датчики, созданные из материалов с природной анизотропией теплопроводности и коэффициента Зеебека (монокристаллический Bi , монокристаллический Bi_2Te_3). Датчики этого типа имеют низкую термостойкость. ГГДТП – датчики, основанные на материале с искусственной анизотропией свойств. Они производятся методом диффузионной сварки пакета из чередующихся материалов (хромель + алюмель, сталь + никель, кремний + алюминий) в среде защитного газа (аргон) [3]. Необходимо обеспечить высокую теплопроводность датчика, чтобы свести к минимуму искажения, вносимые датчиком в эксперимент, и термостойкость в агрессивной среде. Принято решение использовать ГГДТП из композиции медь+никель.

Создание датчиков начинается со сборки пакета. Листы меди и никеля толщиной 0,1 мм, укладываются с чередованием в стопку (рис. 1).

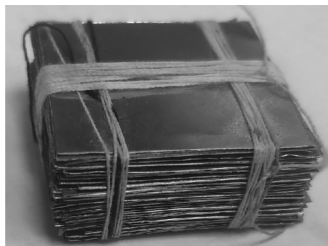


Рис. 1. Заготовка перед диффузионной сваркой

При расчёте толщины финальной заготовки набрано 100 слоев. Полученную стопку помещают в горизонтальную диффузионную печь. Экспериментально определенные параметры сварки: температура в печи 900 °С, время выдержки 45 мин, нагрузка на заготовку 14,5 МПа.

После сварки полученную заготовку (рис. 2, *a*) разрезают на отдельные датчики (рис. 2, *б*).

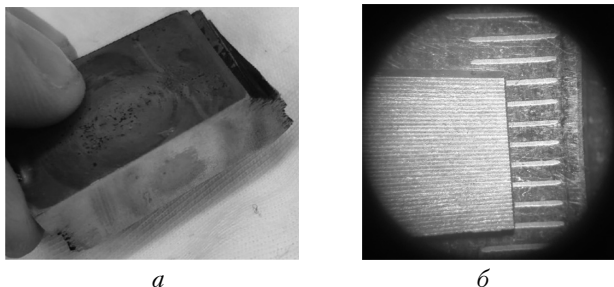


Рис. 2. Заготовка после диффузионной сварки (*a*) и готовый ГГДТП (*б*)

Градуировка ГГДТП происходит в специальном вакуумном стенде [4]. Зависимость вольт-ваттной чувствительности S_0 датчика от температуры $t_{\text{ГГДТП}}$ имеет вид:

$$S_0 = 4,7806 \cdot e^{(-0,011 \cdot t_{\text{ГГДТП}})}$$

Список литературы

1. **Sapozhnikov S.Z.** Searching of the optimum tilt of the pipe at condensation by using gradient heatmetry / S.Z. Sapozhnikov, V.Y. Mityakov, A.V. Mityakov, A.Y. Babich, E.R. Zainullina, A.V. Pavlov // Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series, 1683(2), 2020.
2. **Gusakov A.A.** Aerodynamics and heat transfer over the surface of a single circular fin / A.A. Gusakov, M.A. Grekov, V.V. Seroshtanov. St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 11 (2). 2018. Pp. 151 – 164.
3. **Sapozhnikov S.Z.** Heatmetry The Science and Practice of Heat Flux Measurement / S.Z. Sapozhnikov, V.Yu. Mityakov, A.V. Mityakov. St.-Petersburg, Springer International Publishing, 2020. 209 p.
4. **Митяков В.Ю.** Создание и градуировка первичных преобразователей на основе композиции медь-никель / В.Ю. Митяков, А.В. Павлов, П.Г. Бобылев // Неделя Науки СПбПУ 2019: 29-я Всерос. конф.: СПбПУ, 2019.

V.Yu. Mityakov, V.M. Poroskurin, A.V. Bikmulin, A.V. Pavlov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Russia 195251, St.Petersburg, Polytechnicheskaya, 29

CREATION AND CALIBRATION OF HETEROGENEOUS GRADIENT HEAT FLUX SENSORS FOR EXPERIMENTS IN THE DBVR-10/13 BOILER FURNACE

СОДЕРЖАНИЕ

ЛЕКЦИИ

- Кузенов В.В., Рыжков С.В., Воронина Е.А.** МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЗАМАГНИЧЕННЫХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗАХ И ПЛАЗМЕ 12
- С.А. Исаев.** ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ СТРУКТУРИРОВАННЫЕ ПОВЕРХНОСТИ ПЛОСКИХ ПЛАСТИН И СТЕНОК МИНИ- И МАКРОКАНАЛОВ НА ОСНОВЕ ЯВЛЕНИЯ АНОМАЛЬНОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ОТРЫВНОГО ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА В НАКЛОННЫХ КАНАВКАХ .. 14
- Сорокин А.П., Кузина Ю.А., Денисова Н.А.** ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОГИДРАВЛИКИ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ (ДОСТИГНУТЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЙ) 16
- Кузнецов В.В.** ТЕПЛОФИЗИКА ФАЗОВЫХ И ХИМИЧЕСКИХ ПРЕВРАЩЕНИЙ НА МАЛЫХ И СВЕРХМАЛЫХ МАСШТАБАХ 18
- Мильман О.О.** ВОЗДУШНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ И СУХИЕ ГРАДИРНИ. НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ 20
- Коновалов Д.А., Малеваный М.В., Кожухов Н.Н.** ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ОДНОФАЗНОМ ТЕЧЕНИИ ОХЛАДИТЕЛЯ В ПОРИСТОМ КАНАЛЕ С ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ГЕОМЕТРИЕЙ 22
- Соловьев С.Л., Соловьев Д.С.** НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕПЛООБМЕНА В АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ 24

Кичатов Б.В. МИКРО И НАНОМОТОРЫ	26
Панкратов Е.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАЧАЛЬНОЙ ЗАКРУТКИ ПОТОКА НА ФОРМИРОВАНИЕ ВТОРИЧНЫХ ВИХРЕЙ В КОЛЬЦЕВЫХ КАНАЛАХ С НЕПОДВИЖНЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ	28
Митрофанова О.В. ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В СЛОЖНЫХ КАНАЛАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК	30
Чернов А.А. КИНЕТИКА ДЕГАЗАЦИИ ВЫСОКОВЯЗКОГО ГАЗОНАСЫЩЕННОГО РАСПЛАВА ПРИ ЕГО ДЕКОМПРЕССИИ	32
Терехов В.И. АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА. ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА	34
Кузнецов Г.В. ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ВОЗГОРАНИЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА	36
Фрик П.Г. ДИНАМИКА И ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В КОНВЕКТИВНЫХ СИСТЕМАХ С ПЛАВАЮЩИМИ ТЕЛАМИ	38
Павленко А.Н. НОВЕЙШИЕ ДОСТИЖЕНИЯ И НЕРЕШЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ В ИЗУЧЕНИИ КРИЗИСНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ КИПЕНИИ	40
Ненарокомов А.В. ОПТИМАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДОВ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ТЕПЛООБМЕНА	42
Здитовец А.Г. ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЕ В ПОТОКЕ СЖИМАЕМОГО ГАЗА	44
Иванов Н.Г. ЗАДАЧИ ТРЕХМЕРНОГО ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЙ И ТЕПЛОМАССООБМЕНА В ЖИЛЫХ ОТСЕКАХ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ	46

Стрижак П.А. ГАЗОГИДРАТНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ: ПРОБЛЕМЫ И ДОСТИЖЕНИЯ	48
Бердников В.С. СВОБОДНАЯ И СМЕШАННАЯ КОНВЕКЦИЯ В РАЗНОМАСШТАБНЫХ ПРИРОДНЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ	50
Михеев Н.И. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭТАЛОННОЙ БАЗЫ РФ В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ТЕКУЧИХ СРЕД ...	52
Егоров И.В. ЦЕЛОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА	54
Авдеев А.А., Виноградов Д.А. РОСТ, КОНДЕНСАЦИЯ, РАСТВОРЕНИЕ ПАРОВЫХ И ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЕЙ В ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКАХ	56
Деревич И.В. МЕТОДЫ СОВРЕМЕННОЙ ТЕОРИИ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕХНИЧЕСКИХ И БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ	58
Карпухина Т.В., Ковальногов В.Н., Ометова А.А., Карпухина М.В. ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ДИФфуЗИИ ЖИДКОСТИ В КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОМ ПРОСТРАНСТВЕ КИРПИЧА ИЗ ПРЕССОВАННОГО ШЛАМА	60
Салахов Р.Р., Хисматуллин Р.М., Ермаков А.М., Хафизов И.Р., Мелихов М.К. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ КЛИМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОБУСОВ	62

СЕКЦИЯ 1

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОЛЕМЫ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА ПРИ ОДНОФАЗНОЙ КОНВЕКЦИИ

Руденко Ю.К., Пуштаев А.В. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТЕПЛА И ГЕНЕРАЦИЯ ВОЛН ПРИ ЛАЗЕРНОМ ИК-ЗОНДИРОВАНИИ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОСТИ	66
--	----

Нига́й Н.А., Сы́родой С.В. ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ УПЛОТНЕНИЯ ИЗМЕЛЬЧЕННОЙ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ НА ЕЁ ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ СУШКИ	68
Пашкова Н.Д., Никифоров И.В., Гатаулин Я.А. СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЯ В ОБЛАСТИ РАЗВЕТВЛЕНИЯ КАНАЛОВ	70
Бабич Е.В., Колесник Е.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР И ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА ВЯЗКОГО ГАЗА С ОДИНОЧНЫМИ ПРЕПЯТСТВИЯМИ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ, УСТАНОВЛЕННЫМИ НА ПОВЕРХНОСТИ	72
Маслов В.А., Селезнева М.Д., Сероштанов В.В., Греков М.А., Гусаков А.А. ТЕПЛООБМЕН ПРИ ОБТЕКАНИИ ПАРЫ НАГРЕТЫХ ЦИЛИНДРОВ	74
Кучкарова М.Р., Пашкова Н.Д., Гатаулин Я.А. ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПЕРЕХОД В ОТРЫВНОЙ ОБЛАСТИ ЗА АСИММЕТРИЧНЫМ СУЖЕНИЕМ КАНАЛА	76
Здитовец А.Г., Киселёв Н.А., Виноградов Ю.А. ВЛИЯНИЕ НА ЭФФЕКТ ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЯ РЕЖИМОВ ОБТЕКАНИЯ ПАРЫ КРУГОВЫХ ЦИЛИНДРОВ СЖИМАЕМЫМ ПОТОКОМ	78
Гатаулин Я.А., Михеев А.Н. СТРУКТУРА ЛОКАЛЬНО ТУРБУЛЕНТНОГО ТРЕХМЕРНОГО ТЕЧЕНИЯ В ОБЛАСТИ РАЗВЕТВЛЕНИЯ КАНАЛА КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ: ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ РАСХОДОВ НА ВЕТВЯХ	80
Астанина М.С., Шеремет М.А. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНВЕКЦИИ ЖИДКОСТИ ПЕРЕМЕННОЙ ВЯЗКОСТИ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ С ПОРИСТОЙ ВСТАВКОЙ	82
Шулепова Е.В., Шеремет М.А. ЕСТЕСТВЕННАЯ КОНВЕКЦИЯ И ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В ДВУСВЯЗНОЙ ОБЛАСТИ С ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ	84

Лоенко Д.С., Шерemet М.А. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОРИСТЫХ/ТВЕРДЫХ РЕБЕР НА ОХЛАЖДЕНИЕ ТЕПЛО-ВЫДЕЛЯЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА В УСЛОВИЯХ ЦИРКУЛЯЦИИ СТЕПЕННОЙ НАНО-ЖИДКОСТИ	86
Лущик В.Г., Макарова М.С., Попович С.С. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ С ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМ ГРАДИЕНТОМ ДАВЛЕНИЯ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ	88
Лучинкин Н.А., Разуванов Н.Г., Полянская О.Н. ТЕПЛО-ОБМЕН ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В СИСТЕМЕ «КАНАЛ-ТРУБА» В ПОПЕРЕЧНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ	90
Пальчеховская Н.В. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОСПРИИМЧИВОСТИ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ К ЭНТРОПИЙНЫМ И ВИХРЕВЫМ ВОЗМУЩЕНИЯМ	92
Митрофанова Н.В., Поздеева И.Г., Старовойтов Н.А. ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ПЕРЕХОДА К РЕЗОНАНСНОМУ РЕЖИМУ НА ПРИМЕРЕ ИМПАКТНОГО ЗАКРУЧЕННОГО ТЕЧЕНИЯ	94
Хазов Д.Е., Попович С.С., Виноградов Ю.А. ТЕПЛООБМЕН И ТРЕНИЕ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ В ОБЛАСТЯХ ОТРЫВНОГО ТЕЧЕНИЯ ПРИ СВЕРХЗВУКОВЫХ СКОРОСТЯХ	96
Веретенников С.В., Бумагин Д.А. ВИЗУАЛИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В ВИХРЕВОЙ ТРУБЕ	98
Шакиров Р.Р. КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В ПЛОСКИХ РАСШИРЯЮЩИХСЯ КАНАЛАХ	100
Соколов М.А., Разуванов Н.Г. ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В ПРОДОЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ	102
Засимова М.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ВИХРЕВОГО ОБЛАКА, СФОРМИРОВАННОГО ИМПУЛЬСНОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУЕЙ	104

Степашева Е.Д., Засимова М.А., Иванов Н.Г. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧИСЛА ПРИТОЧНЫХ СТРУЙ НА РАЗВИТИЕ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОГО РЕЖИМА ТЕЧЕНИЯ В ВЕНТИЛИРУЕМОМ ПОМЕЩЕНИИ.....	106
Киселева С.В., Тепляков И.О. ПИНЧ-ЭФФЕКТ В ЖИДКО-МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ С ПОЛУСФЕРИЧЕСКИМИ ЭЛЕКТРОДАМИ	108
Красикова А.Д., Засимова М.А. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОКОЛЕБАНИЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУИ, РАСПРОСТРАНЯЮЩЕЙСЯ В УЗКОЙ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПОЛОСТИ.....	110
Подмаркова А.Д., Засимова М.А., Иванов Н.Г. ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ И ПОЛОЖЕНИЯ ТЕПЛООВОГО МАНЕКЕНА В ТЕСТОВОМ ВЕНТИЛИРУЕМОМ ПОМЕЩЕНИИ НА СТРУКТУРУ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООТДАЧУ	112
Богданов Н.Д., Давлетшин И.А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧЛЕНОВ УРАВНЕНИЯ БАЛАНСА КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ	114
Лукьянов А.А., Ничик М.Ю., Пантелеев С.А., Зарипов Д.И. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕСТАБИЛИЗАЦИИ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ С ПОМОЩЬЮ 3D УСТРОЙСТВ	116
Шайдуллин Л.Р., Фадеев С.А. РЕЗОНАНСНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ГАЗА В ЗАКРЫТОЙ ТРУБЕ С НЕОДНОРОДНЫМ РАДИАЛЬНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ	118

СЕКЦИЯ 2

ТЕПЛО- И МАССООБМЕН В ДВУХФАЗНЫХ И МНОГОФАЗНЫХ ПОТОКАХ

Васильев Н.В., Вавилов С.Н., Зейгарник Ю.А., Лиджиев Е.А. ИССЛЕДОВАНИЕ САМОПРОИЗВОЛЬНОГО ТРИГГЕРИНГА ПАРОВОГО ВЗРЫВА НА РАСПЛАВЛЕННЫХ КАПЛЯХ СОЛИ И ОЛОВА	122
--	-----

Стрижак П.А., Ткаченко П.П., Исламова А.Г., Шлегель Н.Е., Кротова С.С. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ВТОРИЧНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТЕЙ В ГАЗОВЫХ СРЕДАХ РАЗНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ	124
Беляев А.В., Сидельников Н.Е., Дедов А.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООТДАЧИ В ПОТОКЕ КИПЯЩЕЙ ЖИДКОСТИ В КАНАЛЕ МАЛОГО ДИАМЕТРА В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ПРИВЕДЕННЫХ ДАВЛЕНИЙ	126
Ершов М.И., Тупоногов В.Г., Рыжков А.Ф., Карманов С.О. ПУЛЬСАЦИИ ДАВЛЕНИЯ В АППАРАТЕ СО СТРУЙНЫМ ФОНТАНИРУЮЩИМ СЛОЕМ БИОМАССЫ	128
Клементьев А.А., Минко К.Б., Артемов В.И. АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА К ЗНАЧЕНИЮ УГЛА СМАЧИВАНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ПЛЕНОЧНОЙ КОНДЕНСАЦИИ МЕТОДОМ VOF	130
Акашев А.А., Решетников А.В., Скоков В.Н. КОРРЕЛЯЦИЯ ПУЛЬСАЦИЙ В ПРЕЦЕССИРУЮЩЕЙ СТРУЕ ПЕРЕГРЕТОГО ЭТАНОЛА	132
Бусов К.А. ПОЛНОЕ РАСКРЫТИЕ СТРУИ ПЕРЕГРЕТОЙ ВОДЫ ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ЧЕРЕЗ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ КАНАЛЫ	134
Зайнуллина Э.Р., Митяков В.Ю., Емельяненко А.А. КОМПЛЕКСНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ВОДЯНОГО ПАРА НА НАРУЖНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРУБЫ	136
Сидоров А.А., Ястребов А.К. ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ МОДЕЛИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ ЛИ В ЗАДАЧАХ С ОБЪЕМНОЙ КОНДЕНСАЦИЕЙ В ПОТОКЕ	138
Сидоров А.А., Ястребов А.К. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕМНОЙ КОНДЕНСАЦИИ В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ПАРОВОЖИДКОСТНОГО ТУРБОДЕТАНДЕРНОГО АГРЕГАТА	140

Мордовской А.С., Шамирзаев А.С., Кузнецов В.В. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ СИСТЕМОЙ ВЫСОКОПЛОТНЫХ МИКРОСТРУЙ В ЩЕЛЕ- ВОМ МИКРОКАНАЛЕ	142
Мордовской А.С., Шамирзаев А.С. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ ЗЕОТРОПНОЙ СМЕСИ R32/R134A В МИКРОКАНАЛЬНОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ	144
Корняков И.А., Пузина Ю.Ю., Ячевский И.А., Крюков А.П. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ПАРОВОЙ ПЛЕНКИ ПРИ КИПЕНИИ ГЕЛИЯ П С РАСКРЫТОЙ МЕЖФАЗНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ	146
Коновалов Д.А , Кожухов Н.Н., Медведев И.И., Орехова М.Т. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ ОХЛАДИТЕЛЯ В ПОРИСТОМ КОМПАКТ- НОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ	148
Томин А.С., Файзуллин М.З., Захаров М.С., Коверда В.П. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ АМОΡФНЫХ ВОДНО-ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ КОНДЕНСАЦИЕЙ ВСТРЕЧНЫХ ПОТОКОВ	150
Терешкин В.С., Левашов В.Ю. МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИ- ЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ ГОМОГЕННОЙ НУКЛЕАЦИИ	152
Майоров В.О., Левашов В.Ю., Крюков А.П., Терешкин В.С. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГОМОГЕННОЙ НУКЛЕАЦИИ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ	154
Пискунов М.В., Ашихмин А.Е., Фёдоров В.С. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КАПЕЛЬ ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО БИОПОЛИМЕРА, НАПОЛНЕННОГО ЧАСТИЦАМИ МИКРОГЕЛЯ, С ГЛАДКОЙ И НАНОВОЛОКНИСТОЙ ПОВЕРХНОСТЯМИ	156

Пономарев А.А., Шараборин Д.К., Хребтов М.Ю., Мулладжанов Р.И., Дулин В.М. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА УВЕЛИЧЕНИЯ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ ЭТАНОЛА ПРИ НАЛИЧИИ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ	158
Исламова А.Г., Антонов Д.В., Стрижак П.А. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ С ПИРОЛИЗИРУЮЩЕЙСЯ ПОВЕРХНОСТЬЮ УГЛЯ	160
Карнозова Е.А., Муратов М.И., Кули-Заде Т.А., Знаменская И.А. ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ И ПЛАЗМЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА СТЕНКИ КАНАЛА ..	162
Павлов А.В., Кикоть Н.Е., Бобылев П.Г., Сапожников С.З. ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ МОДЕЛИ НА ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ НЕДОГРЕТОЙ ВОДЫ НА ПЕРЕГРЕТОЙ ПОВЕРХНОСТИ	164
Букреева А.Д., Грабежная В.А. КРИЗИС ТЕПЛООБМЕНА В ПАРОГЕНЕРИРУЮЩЕЙ ТРУБЕ ПРИ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ	166
Волков С.М., Светоносков А.И., Лобанов П.Д., Прибатурин Н.А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В МОДЕЛИ ТВС С ТВЭЛОМ КРЕСТООБРАЗНОЙ ГЕОМЕТРИИ	168
Булович С.В., Васильев А.А. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КОЛЬЦЕВОЙ АСИММЕТРИЧНОЙ НЕДОРАСШИРЕННОЙ СТРУИ	170
Васильев А.А., Булович С.В. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ЗАРЯЖЕННЫХ МИКРОКАПЕЛЬ В СПЛОШНОЙ СРЕДЕ	172
Попович С.С., Виноградов Ю.А., Здитовец А.Г. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОГИДРОДИНАМИКИ ТЕЧЕНИЯ ВОЗДУШНО-КАПЕЛЬНОГО ПОТОКА В ПЛОСКОМ СВЕРХЗВУКОВОМ СОПЛЕ	174

Евко Е.А., Пузина Ю.Ю., Ячевский И.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ГЕЛИЯ-II В U-ОБРАЗНОМ КАНАЛЕ	176
Дементьев Ю.А., Роньшин Ф.В., Чиннов Е.А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В ПЛОСКОМ МИКРОКАНАЛЕ ПРИ ТЕЧЕНИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ И ПАРОВОЙ СМЕСИ	178
Тупоилова А.В., Беляев А.В., Дедов А.В. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕННЫХ УСТРОЙСТВ ПРИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ	180
Саушин И.И. КРИТЕРИЙ ОБРАЗОВАНИЯ И РАСПАДА СТРУИ РЕЛЕЯ ПРИ УДАРЕ КАПЛИ О ЖИДКОСТЬ С ЖИДКОЙ ПЛЕНКОЙ	182
Гольцман А.Е. ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛЯ СКОРОСТИ АЭРОЗОЛЬНЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЙ	184
Роньшин Ф.В., Зорькина А.И., Редников А., Tadrist L., Кабов О.А. ИССЛЕДОВАНИЕ РОСТА ОДИНОЧНОГО ПАРОВОГО ПУЗЫРЯ В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ	186
Ячевский И.А., Пузина Ю.Ю. КРИТИЧЕСКИЕ ТЕПЛОВЫЕ ПОТОКИ ПРИ КИПЕНИИ ГЕЛИЯ II В СТЕСНЕННЫХ УСЛОВИЯХ	188
Белавина Е.А., Бердюгин Д.А., Ерпулёв А.А., Пятницкая Н.Ю. ОБЪЕМНОЕ ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЕ ИМИТАТОРА РАСПЛАВА СОЛИ, ПРИМЕНИТЕЛЬНО К КОНЦЕПЦИИ ЖИДКОСОЛЕВОГО РЕАКТОРА	190
Осищов А.Н., Голубкина И.В. ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСИ МЕЛКИХ КАПЕЛЬ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ГАЗА НА ТЕПЛООБМЕН В ОБЛАСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОЛНЫ УПЛОТНЕНИЯ С ПЛОСКОЙ СТЕНКОЙ	192
Сердюков В.С., Малахов И.П., Суртаев А.С. ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА ЛОКАЛЬНЫЙ ТЕПЛООБМЕН ПОД ПАРОВЫМИ ПУЗЫРЯМИ ПРИ КИПЕНИИ ЖИДКОСТИ.....	194

СЕКЦИЯ 3

ТЕПЛО- И МАССООБМЕН В УСЛОВИЯХ ХИМИЧЕСКИХ ПРОВЕРАЩЕНИЙ, ГОРЕНИЕ

Веселов К.Е., Евдокимов О.А. ИССЛЕДОВАНИЕ
ГАЗОДИНАМИКИ И ГОРЕНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА
В МОДЕЛЬНОЙ ВИХРЕВОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ 198

Косторева Ж.А., Косторева А.А., Кузнецов Г.В.
ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА ЗАЖИГАНИЯ ЧАСТИЦЫ
ДРЕВЕСНОЙ БИОМССЫ 200

Орлова Е.Г., Феоктистов Д.В. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ТЕКСТУРИРОВА-
ННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ КЕРАМИКИ 202

Мильман О.О., Брдынкевич Д.В., Крылов В.С., Птахин А.В.
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТАНОВКИ
ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ГАЗОВОГО ПРЕРЕГРЕВА ПАРА
(ДПП) 204

Хахулин П.С. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ
ЛОБОВОЙ ЧАСТИ СПУСКАЕМОГО АППАРАТА ВЫСОКО-
СКОРСОТНЫМ ПОТОКОМ 206

Судаков В.С. ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЕ ДВИЖЕНИЕ КАПЕЛЬ
В ЭМУЛЬСИИ ПРИ ПРОТЕКАНИИ В НЕЙ ХИМИЧЕСКИХ
РЕАКЦИЙ 208

Носкова К.Р., Гурьянова М.М., Гурьянов А.И. СТРУКТУРА
ТЕЧЕНИЯ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ГТД С УЧЕТОМ
ВЛИЯНИЯ ГАЗОДИНАМИКИ КОМПРЕССОРА 210

Коршунов А.М. ДВИЖЕНИЕ ХИМИЧЕСКИ РЕАГИРУЮЩЕГО
БИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПЛОВЦА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ 212

Слосарский К.В., Асильбеков А.К. ЗАЖИГАНИЕ СМЕСЕЙ
АНТРАЦИТА С ПИРОЛИЗНОЙ ЖИДКОСТЬЮ РАЗЛИЧНОЙ
ДРЕВЕСИНОЙ БИОМАССЫ 214

Орлова Е.Г., Лага Е.Ю., Феоктистов Д.В. ПРИЧИНЫ РЕАЛИЗАЦИИ ВТОРИЧНОГО РАСПЫЛЕНИЯ КАПЕЛЬ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ТЕРМОДИНАМИКИ СМАЧИВАНИЯ И ТЕОРИИ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭНЕРГИИ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ	216
Клюев А.Ю., Гурьянов А.И. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАСШТАБА СТРУИ НА СТРУКТУРУ ЛАМИНАРНЫХ И ТУРБУЛЕНТНЫХ ДИФFUЗИОННЫХ ПЛАМЕН	218
Халиулин Р.Р., Давыдов Н.В., Юсеф В.М., Сейид Джафари С.С. ТЕЧЕНИЕ В ПРОТИВОТОЧНОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ	220
Моисеева К.М., Крайнов А.Ю. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ РЕАКЦИОННОСПОСОБНЫХ ГАЗОВ И ГАЗОВЗВЕСЕЙ В УЗКИХ КАНАЛАХ	222
Колегов Г.А., Моисеева К.М., Крайнов А.Ю. РАСЧЕТ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С УЧЕТОМ ГОРЕНИЯ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ	224
Мальшев Д.Ю., Тамашевич М.С. ВЛИЯНИЕ ВИДА ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ НА ВРЕМЕНА ЗАДЕРЖКИ ЗАЖИГАНИЯ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА.....	226
Бикмулин А.В., Бобылев П.Г., Проскурин В.М., Митяков В.Ю. ВЛИЯНИЕ РАСХОДА ОКИСЛИТЕЛЯ НА МЕСТНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ТЕПЛОвого ПОТОКА ОТ ДИЗЕЛЬНОЙ ГОРЕЛКИ OILON KP-6	228
Суворин И.Д., Рыжков А.Ф., Симбирятин Л.В. СРАВНЕНИЕ СТРУКТУРНО-ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОДИСПЕРСНОГО ПОТОКА ДЛЯ РЕЖИМОВ ГОРЕНИЯ И ГАЗИФИКАЦИИ	230
Комова О.В., Гурьянов А.И. ЭМИССИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ВОДОРОДСОДЕРЖАЩЕГО ТОПЛИВА В ПРОТИВОТОКЕ В ОБЛАСТИ СВЕРХБЕДНЫХ РЕЖИМОВ	232

Бусыгин С.В., Ковальногов В.Н., Генералов Д.А., Сапунов В.В., Федоров Р.В., Шепелев И.И. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВ В ЭНЕРГОУСТАНОВКАХ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ЭМИССИИ NOX В ПАРОВЫХ КОТЛАХ..... 234

Шегуров А.В., Ковальногов В.Н., Шеркунов В.В., Карпов Д.А., Куприянов А.И., Гладилин Н.Д. ОПТИМИЗАЦИЯ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВ В ЭНЕРГОУСТАНОВКАХ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ ЭМИССИЙ 236

Антонов Д.В., Стрижак П.А. ФРАГМЕНТАЦИЯ И ЗАЖИГАНИЕ ЖИДКИХ БИОТОПЛИВ ПРИ РАЗНЫХ СХЕМАХ НАГРЕВА.. 238

**СЕКЦИЯ 4
РАДИОЦИОННЫЙ, СЛОЖНЫЙ И СОПРЯЖЕННЫЙ
ТЕПЛООБМЕН В ТОМ ЧИСЛЕ ДИСПЕРСНЫЕ ПОТОКИ
И ПОРИСТЫЕ СРЕДЫ**

Штелинг В.С., Толмачев В.В., Соколова А.Д. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДИСПЕРГИРОВАННЫМ ПОТОКОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ 242

Зинкевич В.П. АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА В ЭКРАННОВАКУУМНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ 244

Некрасов Д.А., Захаров Н.С., Мошин А.А. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНЫХ СВОЙСТВ ГИДРОГЛЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ 246

Вершинина Ю.В., Павлушин Н.Н. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ПРОТЕКАНИИ ВОДЫ ЧЕРЕЗ ШАРОВУЮ ЗАСЫПКУ 248

Вершинина Ю.В., Мишин Г.А., Попандопуло Х.Ю. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА И ГИДРОДИНАМИКИ В ШАРОВЫХ ЗАСЫПКАХ С ВНУТРЕННИМ ТЕПЛО-ВЫДЕЛЕНИЕМ 250

Абрамов А.В., Дуников Д.О. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В МЕТАЛЛОГИДРИДНОМ РЕАКТОРЕ ПРИ ПОГЛОЩЕНИИ ВОДОРОДА	252
Голубков А.Д. ГАЗОГЕНЕРАЦИЯ ПРИ ФОТОКАТАЛИЗЕ КАК МЕТОД УМЕНЬШЕНИЯ СИЛЫ ТРЕНИЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ МОТОРОВ НА МЕЖФАЗНОЙ ПОВЕРХНОСТИ	254
Петрова С.В., Городнов А.О., Лаптев И.В. МОДЕЛЬ СОПРЯЖЕННОГО ТЕПЛООБМЕНА В РАКЕТНОМ БАКЕ ПРИ ОТБОРЕ ТОПЛИВА С ОДНОВРЕМЕННЫМ НАДДУВОМ.....	256
Кузьмин В.А., Заграй И.А., Шмакова Н.А. ОПЫТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ТОПОЧНЫХ ГАЗОВ В ПАРОВОМ КОТЛЕ ПРИ ФАКЕЛЬНОМ СЖИГАНИИ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ	258
Михайленко С.А., Шеремет С.А. ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИОННОГО ВРАЩЕНИЯ НА КОНВЕКТИВНО-РАДИАЦИОННЫЙ ТЕПЛООБМЕН В ПОЛОСТИ С ИСТОЧНИКОМ ЭНЕРГИИ ...	260
Колчанова Е.А., Колчанов Н.В. КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛОМАССО-ПЕРЕНОС В ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ВОЗДУШНО-ПОРИСТЫХ СИСТЕМАХ С РАЗНЫМ ЧИСЛОМ ПОДСЛОЕВ	262
Гриненко А.С. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК ПРИ СВЕРХОРИТАЛЬНОМ ВХОДЕ ПИЛОТИРУЕМОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В АТМОСФЕРУ ЗЕМЛИ.....	264
Бухаров А.В., Вишневский Е.В., Гиневский А.Ф. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЖИДКИХ СТРУЙ КСЕНОНА И КРИПТОНА В ВАКУУМ	266
Сидоренко Н.Ю., Ананьев А.В., Лаптев И.В. ИССЛЕДОВАНИЕ КАПИЛЛЯРНОЙ УДЕРЖИВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СЕТЧАТОГО МАТЕРИАЛА С МИКРОПОРАМИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ	368

**СЕКЦИЯ 5
ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО-
И МАССООБМЕНА**

Сыродой С.В., Кузнецов Г.В., Войткова К.А. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ КАПЛИ ВОДЫ С НАГРЕТОЙ ПОВЕРХНОСТИ 272

Дорожкин А.В., Орлова Е.Г., Феоктистов Д.В. ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТЯХ МАТЕРИАЛОВ, ТЕКСТУРИРОВАННЫХ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ 274

Князев С.А., Яковлева В.В., Сероштанов В.В., Митяков В.Ю. ГРАДИЕНТНАЯ ТЕПЛОМЕТРИЯ В ИССЛЕДОВАНИИ ТЕПЛООБМЕНА ВНУТРИ ОВАЛЬНО-ТРАНШЕЙНОЙ ЛУНКИ 276

Швецов Д.А., Павленко А.Н., Жуков В.И. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЛОЕ ЖИДКОСТИ НА МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ 278

Воробьев Д.В., Дмитриев А.С. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ РЕЖИМОВ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ В СОСТАВЕ ЛАЗЕРНОГО МОДУЛЯ 280

Железнов А.П., Птахин А.В., Крылов В.С. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КИПЕНИЯ И КОНДЕНСАЦИИ ХЛАДАГЕНТА 282

Данильчик Е.С., Сухоцкий А.Б., Жукова Ю.В., Маршалова Г.С., Чорный А.Д., Баранова Т.А., Кадыров Р.Г., Миронов А.А., Попов И.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОТЫ РЕБРА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛООТДАЧИ ОДНОРЯДНОГО ПУЧКА В РЕЖИМЕ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ, ИНТЕНСИФИЦИРОВАННОЙ С ПОМОЩЬЮ ВЫТЯЖНОЙ ШАХТЫ 284

Сергеев М.Н., Сергеев А.М. СИСТЕМА СИЛЬНО ЗАКРУЧЕННЫХ СТРУЙ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТРУБЕ 286

Коновалов Д.А., Ряжских В.И., Кожухов Н.Н., Завгородний А.А. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛО- ОБМЕНА В КАНАЛАХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК С РАЗВИ- ТЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ.....	288
Золотухин А.В., Терехов В.И. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИ- МЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ АЭРОДИНАМИКИ ПРИ ОБТЕКАНИИ СОТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	290
Максимов И.А., Сабанова Е.Н., Киндра В.О. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРА- МЕТРОВ ИНТЕНСИФИКАТОРА НА ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕС- КИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАСТИНАТО-ТРУБЧАТОГО ТЕПЛООБМЕННИКА	292
Хабибуллин И.И. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА В АППАРАТАХ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ	294
Ситников В.О., Гагапова Е.Я. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ С НАГРЕТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЧИСЛАХ ВЕБЕРА.....	296
Черника И.М., Болога М.К. ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ НА МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОС- ТЯХ ПОД ВОЗДЕЙСВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ	298
Кикоть Н.Е., Бобылев П.Г., Павлов А.В., Сапожников С.З. ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДОВ ТИТАНА И АЛЮМИ- НИЯ НА ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ НЕДОГРЕТОЙ ВОДЫ	300
Маршалова Г.С., Лира М.С., Данильчик Е.С., Миронов А.А. ВЛИЯНИЕ ВЫСОТЫ РЕБРА НА ТЕПЛООТДАЧУ АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ В РЕЖИМЕ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ.....	302
Алексеев П.Д., Леухин Ю.Л. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВ- НОСТИ СТРУЙНОГО МОДУЛЬНОГО РЕКУПЕРАТОРА.....	304
Пещенок Ю.А., Вожаков И.С. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КИПЕНИЯ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ПАВ В КАПИЛЛЯРНОЙ ТРУБЕ.....	306

Барсуков А.В., Терехов В.В., Терехов В.И. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА В КОМПЛАНАРНЫХ КАНАЛАХ	308
Владимиров В.Ю., Чиннов Е.А., Хмель С.Я. ВЛИЯНИЕ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ СУПЕРГИДРОФОБНЫМИ КАВЕРНАМИ НА МЕДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ	310
Губанова Т.А., Забиров А.Р., Ягов В.В. ОХЛАЖДЕНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕЛ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СТРУИ НЕДОГРЕТОЙ ЖИДКОСТИ	312
Пещенок Ю.А., Семенов А.А., Гатапова Е.Я. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОСЛЕДНЕЙ СТАДИИ ИСПАРЕНИЯ ПЛОСКОЙ КАПЛИ МОДЕРНИЗИРОВАННЫМ ШЛИРЕН МЕТОДОМ ...	314
Бездудный А.В. СИСТЕМА ЦИКЛИЧЕСКОГО ХРАНЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ НА БАЗЕ МЕТАЛЛОГИДРИДНОГО УСТРОЙСТВА	316
Каргусова А.Ю., Петрушин А.А., Птахин А.В., Днепровская П.Ю. ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМЫ ГАЗОУДАЛЕНИЯ В КОНДЕНСАТОРАХ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТУРБОМАШИН С УТИЛИЗАЦИЕЙ СО₂	318
Полуянов А.О., Колесниченко И.В. ГЕНЕРАЦИЯ ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ ПЕРЕМЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ	320
Абсадилов Б.А., Агзамов Ш.К. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ РАБОТЫ АВО ПРИ ПОДГОТОВКЕ ГАЗА К ТРАНСПОРТУ	322
Гибанов Н.С., Шеремет М.А. ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ КАНАЛА НА РЕЖИМЫ СМЕШАННОЙ КОНВЕКЦИИ ПРИ НАЛИЧИИ НАГРЕВАТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА И ТЕПЛООТВОДЯЩИХ РЕБЕР	324

Федоренко Р.М., Антонов Д.В., Стрижак П.А.
ПОЛУЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ
ВТОРИЧНЫХ ФРАГМЕНТОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ МИКРО-
ВЗРЫВНОГО РАСПАДА 326

Мунгалов А.С., Кочкин Д.Ю. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ
И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХФАЗНОГО
ТЕЧЕНИЯ В МИНИКАНАЛЕ 328

**Малахов И.П., Сердюков В.С., Сафонов А.И., Родионов А.А.,
Старинский С.В., Суртаев А.С.** БИФИЛЬНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ
ИЗ КРЕМНИЯ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА
И ПОВЫШЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК
ПРИ КИПЕНИИ 330

СЕКЦИЯ 6

ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ ТЕПЛО-И МАССООБМЕНА

Овсянник А.В., Ключинский В.П. ТРИГЕНЕРАЦИОННАЯ
И ПОЛИГЕНЕРАЦИОННАЯ УТИЛИЗАЦИЯ ВТОРИЧНЫХ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ 334

Попов И.А., Арсланбаев С.Ч. ИССЛЕДОВАНИЕ
ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НОВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ
УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ 336

**Шурупов В.А., Следнев В.А., Плотников Л.В.,
Красильников Д.Н., Давыдов Д.А.** ВЕРИФИКАЦИЯ
РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕРМОМЕХАНИКИ
ПОТОКОВ ВО ВПУСКНОЙ СИСТЕМЕ ДВС ПОСРЕДСТВОМ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ 338

Медведев В.А., Осипов Л.Е., Плотников Л.В., Смирных М.Д.
ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ТЕПЛООБМЕНА
В ВЕРТИКАЛЬНОМ КОНИЧЕСКОМ ДИФФУЗОРЕ 340

Чан К.Т., Дмитриев А.С. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ
И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
НАГРЕВА И ИСПАРЕНИЯ НАНОЖИДКОСТЕЙ ПОД
ДЕЙСТВИЕМ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ 342

Рожков А.Д. ВЛИЯНИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕПУСКА ВОЗДУХА И МЕСТА ОТБОРА ПЕРЕПУСКАЕМОГО ВОЗДУХА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА ГТУ 344

Попова Д.К., Кортиков Н.Н. МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООБМЕНА НА ПОВЕРХНОСТИ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИНОЙ СТУПЕНИ 346

Замалеев М.М., Абрамов А.В., Абайдуллина Ю.Р., Киселев И.И. ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГОРОДСКИХ ТЭЦ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ТКО ДО 2030 ГОДА 348

Кочнев К.В. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА ПО СПЕКАНИЮ СИМУЛЯТОРА ЛУННОГО РЕГОЛИТА В ЗЕМНЫХ УСЛОВИЯХ 350

Деревич И.В., Матюхина Д.И. КОРРЕКТНОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О ПРОГРЕВЕ КОМПОЗИТНОЙ КАПЛИ УГЛЕВОДОРОД – ВОДА 352

Деревич И.В., Матюхина Д.И. РАСЧЕТ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПЕРЕГРЕВА ВОДЫ ПРИ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОМ РОСТЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СТЕНКИ 354

Шлегель Н.Е., Стрижак П.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ КАПЕЛЬ ВОДОМАЗУТНОГО ТОПЛИВА 356

Хахалев Ю.А., Корнилова М.И., Ковальногов В.Н., Чукалин А.В., Хахалева Л.В., Демидов Д.А. СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ В ОКРЕСТНОСТИ ОДИНОЧНОЙ ТУРБИНЫ УЛЬЯНОВСКОГО ВЕТРОПАРКА 358

Корнилова М.И., Ковальногов В.Н., Хахалева Л.В., Федоров Р.В., Петров А.В. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ОКРЕСТНОСТИ ВЕТРОПАРКА 360

Пискунова А.Е., Пискунов М.В., Хомутов Н.А. СОУДАРЕНИЕ ЧАСТИЦ МИКРОГЕЛЯ С ГИДРОФОБНЫМИ ГЛАДКОЙ И НАНОВОЛОКНИСТОЙ ПОВЕРХНОСТЯМИ 362

Цырендоржиев Э.С. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА УЧАСТКАХ ПАССИВНОЙ РАБОТЫ	364
Шувалов Е.А., Веретенников С.В. АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ	366
Колесова А.А., Веретенников С.В., Колесова Е.Г. РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАЩИТНОЙ ПЕЛЕНЫ ЗА ОТВЕРСТИЕМ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРАХ ВДУВА	368
Михайлов Е.А., Степанова А.П., Таранюк А.А. НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ МЕЖДУ ПЛОСКОСТЯМИ	370
Дмитриев А.С., Макаров П.Г., Матвеев Е.Д., Соколова А.П. ТЕРМОИНДУЦИРОВАННАЯ УПРАВЛЯЕМАЯ ФЛОТАЦИЯ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В ВОДНОЙ ВЗВЕСИ	372
Мильман О.О., Перов В.Б., Кондратьев В.Б., Птахин А.В., Крылов В.С. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РЕГАЗИФИКАЦИИ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА В ТРУБАХ	374
Митрофанова О.В., Федоринов А.В. РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СМЕШЕНИЯ ПЕТЛЕВЫХ ПОТОКОВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В СУДОВОЙ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКЕ	376
Кирьянов В.А., Абаимов Н.А., Рыжков А.Ф. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ БИОМАССЫ В ПОТОЧНОМ ГАЗИФИКАТОРЕ	378
Саламатин А.А., Халиуллина А.С. МАССОПЕРЕНОС ДВУХ-КОМПОНЕНТНОГО ЭКСТРАКТА В УСЛОВИЯХ СВЕРХ-КРИТИЧЕСКОЙ ФЛЮИДНОЙ ЭКСТРАКЦИИ	380
Юдин С.М., Ковешников К.С., Ивочкин Ю.П. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВНУТРИ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ИХ ФРАГМЕНТАЦИИ	382

Балакин Д.Ю., Аронсон К.Э. МЕТОД ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОХЛАДИТЕЛЯ ЭЖЕКТОРА ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ 384

Озерных В.С., Лосев Г.Л., Колесниченко И.В., Гольбрайх Е. РАЗВИТИЕ ВИХРЕВОГО ТЕЧЕНИЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИЛ ... 386

Демидов А.Л., Рябчиков А.Ю., Аронсон К.Э., Гончаренко Д.С. ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМЫ КОНДЕНСАТОР-ЭЖЕКТОР ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ПРИСОСАХ ВОЗДУХА 388

Мильман О.О., Каргуесова А.Ю., Крылов В.С. МЕТОДИКА РАСЧЕТА И ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКО-ЭФФЕКТИВНОГО КОНДЕНСАТОРА ПАРА ИЗ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ С БОЛЬШИМ СОДЕРЖАНИЕМ НЕКОНДЕНСИРУЮЩИХСЯ ГАЗОВ 390

Рязанцев В.А., Забиров А.Р., Ягов В.В., Виноградов М.М., Мологова И.А. ЗАКАЛКА В ПОЛИМЕРНЫХ ЖИДКОСТЯХ .. 392

Молотов И.М., Счастливец А.И. АВТОНОМНОЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ НА БАЗЕ ВИЭ С ВОДОРОДНЫМ АККУМУЛИРОВАНИЕМ ЭНЕРГИИ 394

СЕКЦИЯ 7 МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПРОМЫШЛЕННЫХ И ЛАБОРАТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ТЕКУЧИХ СРЕД (КРУГЛЫЙ СТОЛ)

Валеев А.А., Душин Н.С., Душина О.А., Колчин С.А. ВЫРАВНИВАНИЕ ПРОФИЛЯ СКОРОСТИ В ТЕЧЕНИЯХ С ПУЛЬСАЦИЯМИ ДАВЛЕНИЯ 398

Зайнуллина Э.Р., Митяков В.Ю. МОНИТОРИНГ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ВОДЯНОГО ПАРА НА ПЛАСТИНЕ 400

Логинов Н.И., Брагин Д.С., Верещагина Т.Н. НАСОС-РАСХОДОМЕР ДЛЯ ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ 402

Митрофанова О.В., Поздеева И.Г., Старовойтов Н.А. ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ВИХРЕВОЙ СТРУКТУРЫ ИМПАКТНОГО ЗАКРУЧЕННОГО ТЕЧЕНИЯ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ	404
Егоров К.С., Загайнов И.А., Попович С.С. СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ТРАССЕРОВ ЗАСЕВА ПОТОКА СИСТЕМЫ PIV ПРИ СВЕРХЗВУКОВЫХ СКОРОСТЯХ	406
Митяков В.Ю., Проскурин В.М., Бикмулин А.В., Павлов А.В. СОЗДАНИЕ И ГРАДУИРОВКА ГЕТЕРОГЕННЫХ ГРАДИЕНТНЫХ ДАТЧИКОВ ТЕПЛОвого ПОТОКА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ В ТОПКЕ КОТЛА ДКВР 10/13	408

Научное издание

ПРОБЛЕМЫ ГАЗОДИНАМИКИ
И ТЕПЛОМАССОБМЕНА
В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

XXIV Школы-семинара молодых ученых и специалистов под
руководством академика РАН А.И. Леонтьева, посвященной
100-летию академика РАН В. Е. Алемасова

23 — 27 мая 2023 года
г. Казань, Россия

Компьютерная верстка — Н. Н. Семёнова

ISBN 978-5-6049421-5-4



9 785604 942154

ООО Пк «Астор и Я»

420021, г. Казань, ул. Ахтямова, 4-3, тел.: 212-27-83

Подписано в печать 16.05.23

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 25,11. Тираж 300 экз. Заказ № 64.

АО «Информационно-издательский центр»
Казань, ул. Чехова, 28