

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет

Сибирское отделение Российской академии наук

Морской гидрофизический институт РАН

Национальный комитет по тепломассообмену РАН

ТЕПЛОФИЗИКА И ФИЗИЧЕСКАЯ ГИДРОДИНАМИКА

Тезисы докладов Всероссийской научной конференции
с элементами школы молодых ученых

11 – 17 сентября 2017 г.

Республика Крым, г. Ялта

Новосибирск-2017

Сборник содержит тезисы научных сообщений научных сотрудников, молодых учёных, аспирантов и студентов, доложенных на II Всероссийской научной конференции с элементами школы молодых ученых «Теплофизика и физическая гидродинамика», которая проводилась Институтом теплофизики им. С.С. Кутателадзе, Институтом гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН и Новосибирским национальным исследовательским государственным университетом в Ялте 11–17 сентября 2017 г.

Представлены тезисы докладов по следующим направлениям:

1. Теплообмен и гидродинамика в однофазных средах
2. Гидродинамика и тепломассообмен в многофазных системах
3. Фазовые переходы
4. Газодинамика реагирующих сред, детонационные процессы
5. Численные методы в теплофизике и физической газодинамике
6. Методы и средства теплофизического и газодинамического эксперимента
7. Теплофизические свойства веществ и новые материалы
8. Тепломассообмен и гидродинамика на микро- и наномасштабах
9. Электрофизические явления в газовых и жидких средах
10. Теплообмен и гидродинамика в технологических процессах и защита окружающей среды

ОРГКОМИТЕТ

Председатель

Маркович Д.М., чл.-корр. РАН (ИТ СО РАН)

Зам. председателя

Головин С.В., проф. РАН, д.ф.-м.н. (ИГиЛ СО РАН)

Учёный секретарь

Шестаков М.В. (ИТ СО РАН)

Члены научного комитета

Алексеев С.В., ак. РАН (ИТ СО РАН)
Васильев А.А., проф., д.ф.-м.н. (ИГиЛ СО РАН)
Губайдуллин А.А., проф., д.ф.-м.н. (ИТМ СО РАН)
Дёмышев С.Г., д.ф.-м.н. (МГИ РАН)
Елистратов С.Л., проф., д.т.н. (НГТУ)
Исаев С.А., проф., д.ф.-м.н. (СПбГУ)
Кедринский В.К., проф., д.ф.-м.н. (ИГиЛ СО РАН)
Коротаев Г.К., член-корр. РАН (МГИ РАН)
Кубряков А.И., д.ф.-м.н. (МГИ РАН)

Кузнецов В.В., проф., д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН)
Куйбин П.А., д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН)
Куперштох А.Л., проф., д.ф.-м.н. (ИГиЛ СО РАН)
Леонтьев А.И., ак. РАН (МГТУ)
Павленко А.Н., чл.-корр. РАН (ИТ СО РАН)
Пруэлл Э.Р., к.ф.-м.н. (ИГиЛ СО РАН)
Пухначёв В.В., чл.-корр. РАН (ИГиЛ СО РАН)
Рыжков А.Ф., проф., д.т.н. (УрФУ)
Самодуров А.С., д.ф.-м.н. (МГИ РАН)
Смирнов Е.М., профессор, д.ф.-м.н. (СПбПУ)
Станкус С.В., проф., д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН)
Титов В.М., академик РАН (ИГиЛ СО РАН)
Токарев М.П., к.т.н. (ИТ СО РАН)
Федорук М.П., проф., д.ф.-м.н. (НГУ)
Хабахпашев Г.А., д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН)
Цвелодуб О.Ю., проф., д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН)
Чернов А.А., проф. РАН, д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН)

Технический комитет

Смож Д.В., к.ф.-м.н. (ИТ СО РАН)
Медведев Р.Н., к.ф.-м.н. (ИГиЛ СО РАН)
Ягодницына А.А. (ИТ СО РАН)

Издание сборника тезисов проводилось с авторских листов участников конференции. За ошибки и опечатки авторов издательство ответственности не несет.

Мероприятие проведено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Проект №17-38-10246

ПЛЕНАРНЫЕ ЛЕКЦИИ

THE VAPOR-GAS NUCLEATION RESEARCH

Anisimov M.P.¹⁻³, Hopke P.K.^{1,2}

¹Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk

²Clarkson University, Box 5708, Potsdam, NY

³Nanoaerosol Research Lab, Novosibirsk

E-mail:anisimovmp@mail.ru

The current vapor-gas nucleation theory can produce values that deviate from the experimental results by several orders of magnitude. During the past three decades, the effects of pressure and various carrier gases on homogeneous nucleation have been studied carefully. Classical nucleation theory assumes that the carrier gas only maintains the temperature equilibrium of the clusters with the ambient media. Never the less the gas-pressure effects was revealed by several researches now. The empirical results have supported a dependence of the nucleation rate on the nature and total pressure of the carrier gas. Experiments using different devices also show significant inconsistencies in the measured nucleation rates. It is important to have now a standard system that can be measured over a range of nucleation conditions to test the relevance of experimental data. First version of the high pressure (up to 150 bar) flow diffusion chamber will be developed. It is supposed that several new measuring systems will be created in the frame of the Russian Ministry of Science & Education grant under Contract № 14. Z50.31.0041 issued by February 13th of 2017 to provide the careful nucleation studies for the basic science and the broad spectrum of practical applications for near critical conditions of the model vapor-gas systems.

УСТОЙЧИВОСТЬ ДВУХСЛОЙНЫХ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНЫХ ТЕЧЕНИЙ

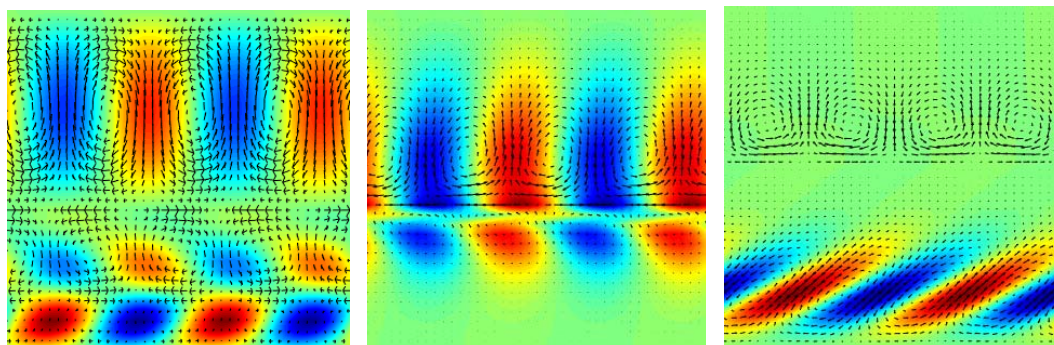
Бекежанова В.Б.

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

E-mail: vbek@icm.krasn.ru

Повышенный интерес к двухслойным течениям вызван необходимостью поиска новых технических решений некоторых задач теплофизики (термостабилизация и жидкостное охлаждение, температурный контроль полупроводниковых устройств), а также при модификации и совершенствовании жидкостных технологий (нанесение многослойных покрытий, функционирование жидкостных чипов и мембран, дистилляция). Одним из важнейших условий корректной работы таких систем является устойчивость основного состояния рабочей жидкости.

В докладе будет представлен обзор результатов исследования устойчивости конвективных течений с поверхностями раздела, в том числе в условиях испарения/конденсации на межфазной границе. Будут приведены точные решения уравнений конвекции, позволяющие моделировать подобные двухслойные течения, описаны механизмы, приводящие к потере устойчивости, дан анализ влияния процессов испарения/конденсации на структуру гидродинамических и тепловых полей, и представлены карты режимов неустойчивости рассматриваемых двухслойных течений.



Примеры конвективных, термокапиллярных и вихревых структур, возникающих при потере устойчивости двухслойного течения с испарением

ВОЛНЫ В НАСЫЩЕННЫХ ПУЗЫРЬКОВОЙ ЖИДКОСТЬЮ ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

Губайдуллин А.А

Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
E-mail: gubai@tmn.ru

Численно исследованы волновые процессы в пористой среде, насыщенной пузырьковой жидкостью, с учетом нелинейности колебаний пузырьков. Нелинейность учтена в уравнении состояния газа и уравнении Рэлея - Ламба. Численное исследование в рамках нелинейной модели выполнено впервые. Получены дисперсионные зависимости для линейных волн в содержащей пузырьковую жидкость пористой среде, а также для основной моды колебаний в цилиндрической полости в такой среде. Рассчитаны частотные зависимости скорости и затухания гармонических волн в цилиндрическом волноводе. Проанализировано влияние свойств пористой среды и параметров пузырьковой жидкости на скорость и затухание волн, а также на глубину проникновения возмущений в окружающую пористую среду. Результаты расчетов показывают хорошее качественное согласование с экспериментальными данными других авторов.

НЕПРЕРЫВНАЯ СПИНОВАЯ ДЕТОНАЦИЯ ТРУДНОДЕТОНИРУЕМЫХ ТОПЛИВНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ В КОЛЬЦЕВЫХ КАМЕРАХ СГОРАНИЯ

Ждан С.А.

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

E-mail: zhdan@hydro.nsc.ru

В докладе представлены результаты по реализации, исследованию и анализу многоволновых режимов непрерывной спиновой детонации (НСД) в проточной кольцевой цилиндрической камере сгорания диаметром 503 мм (ДК-500) топливно-воздушных смесей (ТВС): синтез-газ – воздух, $\text{C}_2\text{H}_4/\text{H}_2$ -воздух, авиационный керосин/ H_2 – воздух. Определены пределы существования НСД по удельному расходу ТВС (минимальные значения). Показано, что структура поперечных детонационных волн (ПДВ) в данных ТВС близка к структуре ПДВ в исследованных ранее ТВС ацетилен – воздух и водород – воздух. Установлено, что все газовые смеси, в том числе самая труднодетонируемая ТВС метан-воздух при добавке водорода можно сжигать в режиме НСД.

В гетерогенной смеси жидкий авиационный керосин/ H_2 – воздух в диапазоне удельных расходов смеси $g_{\Sigma} = 230 \div 565 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$ с варьируемой массовой долей водорода в двухфазном горючем $m_{\text{H}} = G_{\text{H}}/(G_{\text{f}} + G_{\text{H}})$ в диапазоне $m_{\text{H}} = 8.4 \div 42 \%$ впервые реализованы многоволновые режимы НСД с числом ПДВ от пяти до одной. Жидкий керосин (ТС - 1) барботировался водородом и подавался в камеру сгорания. Типичная фоторегистрограмма пятиволновой НСД представлена на рис. 1.

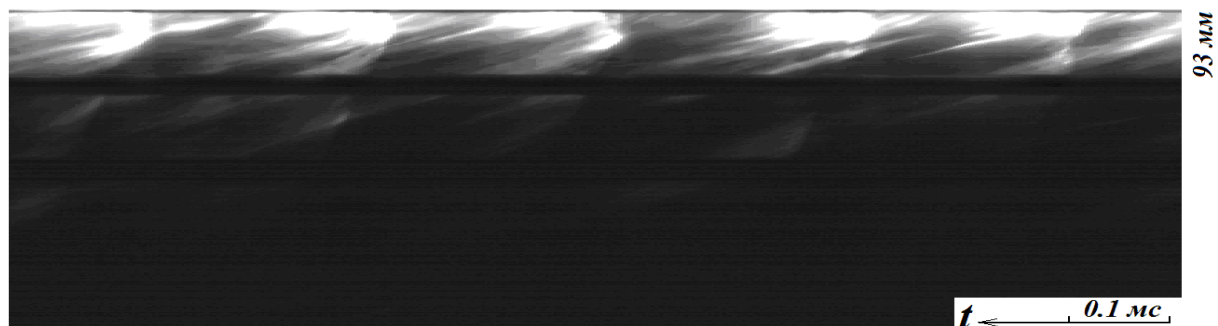


Рис. 1. Фрагмент фоторегистрограммы ПДВ в двухфазной смеси керосин/водород – воздух ($n = 5$).

Применение барботирования жидкого керосина газообразным водородом позволило уменьшить массовую долю водорода в двухфазном горючем от 42 % до 8.4 %. Показано, что количество ПДВ и частота их вращения уменьшаются при уменьшении массовой доли водорода в двухфазном горючем и удельного расхода воздуха, а высота фронта ПДВ растёт. Полученные результаты открывают возможность систематических исследований режимов НСД в гетерогенных ТВС применительно к кольцевым камерам сгорания ВРД.

РАЗРАБОТКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА КОМПОЗИТНЫХ СЕТКАХ, ВЕРИФИКАЦИЯ МОДИФИЦИРОВАННОЙ С УЧЕТОМ ПОПРАВКИ НА КРИВИЗНУ ЛИНИЙ ТОКА В РАМКАХ ПОДХОДА РОДИ-ЛЕШЦИНЕРА-ИСАЕВА SST-МОДЕЛИ 2003 ГОДА НА ТЕСТОВЫХ ЗАДАЧАХ ОТРЫВНОГО ОБТЕКАНИЯ ТЕЛ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В УЗКИХ КАНАЛАХ С ПОМОЩЬЮ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВИХРЕГЕНЕРАТОРОВ

Исаев С.А.

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, Санкт-Петербург
E-mail: isaev@yandex.ru

В лекции рассматриваются связанные между собой тематические модули.

1. Многоблочные вычислительные технологии (МВТ) на основе разномасштабных с наложением структурированных сеток. Решение осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса. Генезис и развитие пакета VP2/3 (скорость-давление, 2D/3D). Композитные сетки (генератор сеток).
2. Коррекция версии SST-модели 2003 года, учитывающая влияние кривизны линий тока в рамках подхода Роди-Лешцинера- Исаева. Ее тестирование на двумерных и трехмерных, стационарных и периодических тестовых задачах аэромеханики и теплофизики.
3. Управление обтеканием затупленных тел с помощью генераторов крупномасштабных вихрей. Снижение лобового сопротивления и головная стабилизация тел с организованным отрывом.
4. Аэродинамика утолщенных тел с вихревыми ячейками. Улучшение АДХ толстых несущих поверхностей.
5. Аэрогидродинамические механизмы вихревой интенсификации теплообмена в каналах с нанесенными лунками в ламинарном и турбулентном режимах.

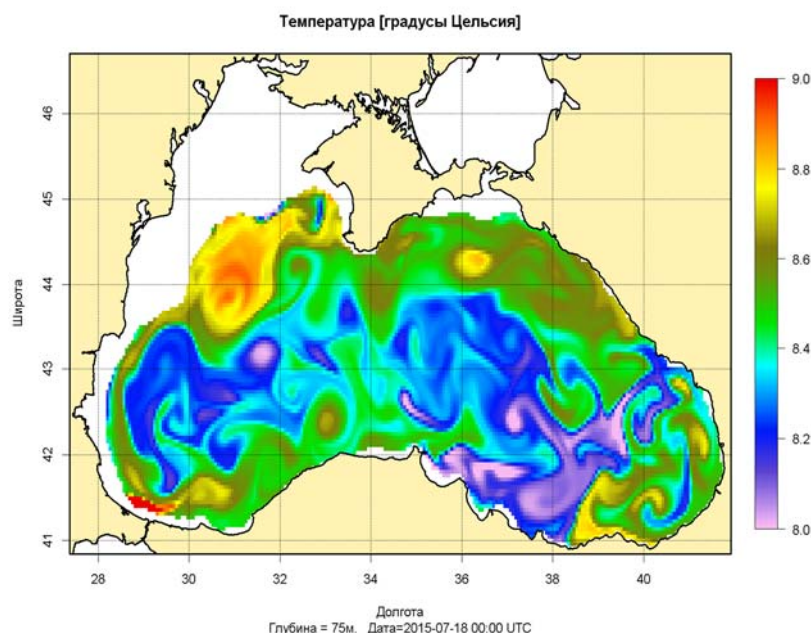
ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК ОСНОВА ОПЕРАТИВНЫХ МОРСКИХ ПРОГНОЗОВ.

Коротаев Г.К.

Морской Гидрофизический институт РАН Севастополь

E-mail: gkorotaev@gmail.com

Характерным свойством морской среды является ее изменчивость. Развитие наблюдательных возможностей позволило создать основанную на гидродинамическом описании полную классификацию типов изменчивости. Наиболее важной для практических потребностей является синоптическая изменчивость океана, определяющая его погоду. Развитие наблюдений океана с ИСЗ и их использование в качестве ретрансляторов непосредственных наблюдений позволило создать системы оперативных морских прогнозов, аналогичных прогнозам погоды. Основой морских прогнозов является гидродинамическое моделирование. Разнообразные численные реализации моделей циркуляции океана дают возможность прогнозировать состояние океана с высокой точностью. Одной из наиболее развитых систем морских прогнозов является морская служба программы Европейской Комиссии «Коперникус», созданная в рамках проектов 7-й рамочной программы «MyOcean». Морской Гидрофизический институт участвовал в проектах «MyOcean», создав Черноморский центр мониторинга и прогноза. Центр распространяет целый ряд продуктов, включающих распределения температуры, соленности и скорости течений от поверхности до дна Черного моря. Пример распределения температуры морской воды на глубине 75 метров представлен на рисунке.



Распределение температуры воды в Черном море на глубине 75 метров 16 июля 2015 года

КАПИЛЛЯРНАЯ ГИДРОДИНАМИКА И ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА ПРИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ В МИКРОРАЗМЕРНЫХ СИСТЕМАХ

Кузнецов В.В.

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

E-mail: vladkuz@itp.nsc.ru

В связи с быстрым ростом приложений, которые требуют передачи больших тепловых и массовых потоков в ограниченном пространстве, все большее внимание в последнее время уделяется разработке двухфазных микроструктурных устройств, которые характеризуются чрезвычайно большим отношением площади поверхности к объему. На их основе создаются перспективные технологии охлаждения компьютерных процессоров и лазерных зеркал, микроканальные парогенераторы, конденсаторы и установки альтернативной энергетики. Ключевую роль в обосновании двухфазных микроструктурных устройств играют фундаментальные закономерности газожидкостных течений и процессов переноса при фазовых переходах в микроразмерных системах, которые представлены в данной работе. Рассмотрено современное состояние исследований и представлены новые результаты в области капиллярной гидродинамики газожидкостных течений и процессов тепломассопереноса при кипении, конденсации и испарении в микроразмерных системах. Установлены закономерности газожидкостного течения в микроканалах, обсуждено влияние поперечного размера канала на режим течения и его свойства в условиях доминирующего влияния капиллярных сил, предложены новые подходы к определению границ режимов течения на основе анализа их статистических характеристик. Представлены закономерности сопряженных гидродинамических и тепломассообменных процессов при фазовых переходах в микроразмерных системах, предложены новые подходы к расчету теплообмена и кризисных явлений в условиях совместного влияния вынужденной конвекции, пузырькового кипения и испарения сверхтонкой пленки жидкости с учетом ее разрыва и формирования сухих пятен. Рассмотрено применение микроразмерных систем в перспективных технологиях отвода экстремально больших потоков тепла, энергетических и криогенных устройствах, системах кондиционирования, химических и биотехнологиях.

ЧАСТИЧНЫЕ РАЗРЯДЫ В КОНДЕНСИРОВАННЫХ ДИЭЛЕКТРИКАХ (ОБЗОР)

Куперштох А.Л.

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет
E-mail: skn@hydro.nsc.ru

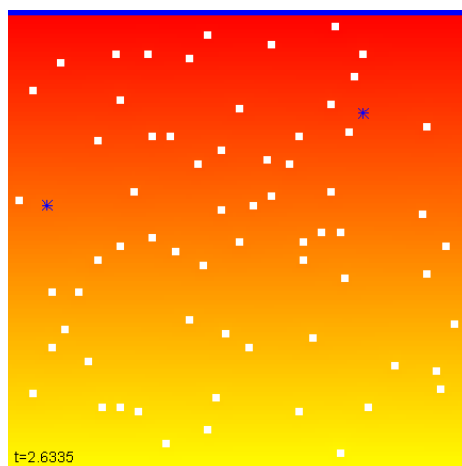
Частичные разряды можно подразделить на три основных типа:

1. Микроразряды в маленьких кавернах или пузырьках, которые всегда существуют как на поверхности электродов, так и в объеме диэлектрика.
2. Частичные разряды в каналах ветвистых структур (стримеров), растущих в объеме диэлектрика.
3. Частичные пробой вдоль границ раздела двух разных диэлектриков.

Во всех случаях во внешней цепи возникают импульсы электрического тока. Маленькие газонаполненные каверны и пузырьки, существующие в конденсированных диэлектриках, сильно сказываются на электрической прочности диэлектрика и, соответственно, на времени жизни оборудования, так как газ внутри каверн и пузырьков имеет электрическую прочность намного ниже, чем у конденсированных диэлектриков. Кроме того, напряженность электрического поля внутри газовых включений выше, чем вовне. Вероятность возникновения микропробоя в каверне зависит от локального электрического поля внутри нее. Во время микропробоя электрическое поле внутри каверны уменьшается из-за накопления зарядов на ее поверхности, и разряд в каверне погасает. Частичные разряды имеют стохастический характер, что нужно учитывать при моделировании.

Исследовался набор маленьких каверн компактной формы, распределенных в объеме диэлектрика между двумя плоскими электродами (см. рис.). Для расчета распределения потенциала и напряженности электрического поля в области между электродами на каждом шаге по времени решалось уравнение Пуассона совместно с уравнениями переноса электрического заряда.

Выполнено стохастическое моделирование частичных разрядов в линейной цепочке газовых каверн, расположенных вдоль линии электрического поля на постоянном и линейно нарастающем напряжении. При определенных условиях в цепочке каверн возникает волна частичных разрядов с “эстафетным” механизмом распространения.



Частичные разряды в кавернах.

Показано распределение потенциала электрического поля.

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА В РОССИИ И МИРЕ. СОСТОЯНИЕ И РАЗВИТИЕ

Нигматулин Б. И.

Институт проблем естественных монополий Москва

E-mail: nb@geotar.ru

В данной работе рассмотрено развитие атомной энергетики, начиная с Первой в мире АЭС до настоящего времени. Показано определяющее влияние произошедших тяжелых аварий на АЭС на ее темпы развития. Сегодняшний этап развития атомной энергетики можно назвать «постфукусимским». Он характеризуется «замораживанием» или сокращением производства электроэнергии на АЭС в развитых странах из-за массового снятия с эксплуатации энергоблоков АЭС, достигших предельного срока службы, замещение доли АЭС в энергобалансе этих стран ТЭС с ПГУ и ВИЭ, конкурентоспособность которых со временем будет только возрастать. Для ТЭС с ПГУ это связано с внедрением новых технологий и сохранением низкой цены газа на достаточно длительный срок. Для ВИЭ — это непрерывное внедрение новых технологий и соответствующее удешевление электропроизводства. Для существующего уровня мирового электропроизводства на АЭС извлекаемых запасов природного урана хватит минимум на 100–130 лет (в зависимости от себестоимости добычи). При оптимистическом (максимальном) прогнозе роста электропроизводства на АЭС в период 2016–2050 гг. извлекаемых запасов природного урана, установленных на 01.01.2015 г., хватит минимум на 60–80 лет. И это без учета роста разведанных запасов урана и развития новых технологий его добычи. Можно предположить, что, судя по опыту «постоянно прогнозируемого истощения газовых и нефтяных резервов», запасы урана будут постоянно увеличиваться.

РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ КОМБИНИРОВАННЫХ ПАРОГАЗОВЫХ ЦИКЛОВ С ВНУТРИЦИКЛОВОЙ ГАЗИФИКАЦИЕЙ

Рыжков А.Ф.

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург
E-mail: af.ryzhkov@mail.ru

В мировой энергетике парогазовые установки с внутрицикловой газификацией твердого топлива интенсивно развиваются как направление, альтернативное прямому сжиганию, и достигли в настоящее время коммерческого успеха. Однако по техническим показателям они далеки от ПГУ на природном газе, что, в частности, обусловлено недостаточным развитием теории комбинированных парогазовых циклов, обремененных собственным узлом получения топливного газа из твердого органического топлива, а комплексные исследования совместной работы технологической (узла внутрицикловой газификации) и энергетической (ПГУ) частей общей энергоустановки находятся в стадии разработки, о чем свидетельствуют публикации последних лет в ведущих международных и отечественных журналах.

Развитие теории и практики комбинированных парогазовых циклов с внутрицикловой газификацией происходит по двум направлениям, касающимся специфики действия на процессы основных термодинамических параметров – давления и температуры в узловых точках технологической схемы ПГУ-ВЦГ и нацеленным на уменьшение разрыва по основным энергетическим показателям между технологиями ПГУ-ВЦГ и ПГУ на природном газе и увеличение экономичности ПГУ в целом.

В лекции приводится систематический анализ эффективности комбинированного парогазового цикла с внутрицикловой газификацией твердого топлива различной конфигурации в новом диапазоне давлений и температур.

INTERMITTENT AVALANCHE DYNAMICS OF IMBIBITION FRONTS

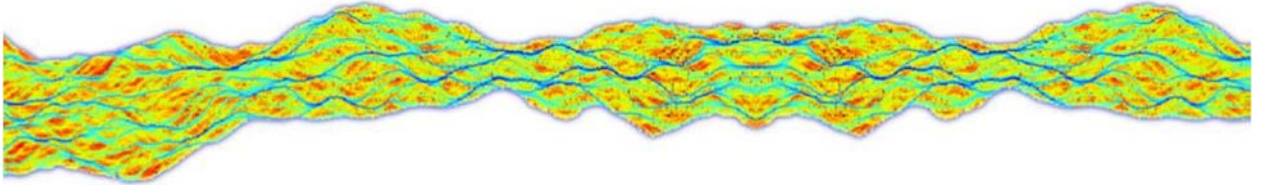
Clotet X.¹, Planet R.², Ortín J.² and Santucci S.³

¹ Physics Department, Clark University, Worcester, MA (USA)

² Departament d'Estructura i Constituents de la Materia, Universitat de Barcelona, Spain

³ Laboratoire de Physique, CNRS UMR 5672, ENS de Lyon, France

E-mail: stephane.santucci@ens-lyon.fr



We study experimentally the dynamics of a viscous wetting fluid interface forced to invade a disordered medium –a model open fracture– at constant flow rate.

Distortions of the advancing imbibition front produced by capillary pressure fluctuations (due to the heterogeneities of the medium) are damped by interfacial tension and fluid viscosity. The competition of those stabilizing and destabilizing forces operating at different length scales leads to a kinetic roughness process characterized by critical interfacial fluctuations and a collective avalanches dynamics.

Using fast and high-resolution imaging, we could show that the imbibition front motion takes place by localized bursts, whose lateral sizes, areas and durations are power-law distributed up to a cut-off scale, which diverges as the Capillary number of the displacement decreases $Ca \rightarrow 0$, corresponding to a critical depinning transition. Those capillary bursts triggered from the smallest scale of the disorder up to the scale at which viscous dissipation becomes dominant lead to anomalous Gumbel-like fluctuations, and a strongly intermittent–turbulent-like–behavior of the global invasion process.

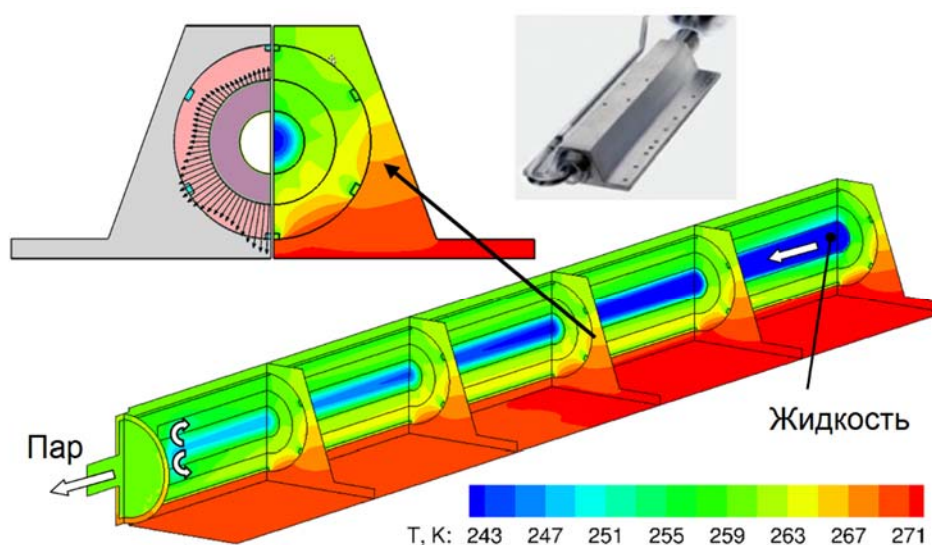
ТРЕХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ТЕПЛОВЫХ ТРУБАХ

Смирнов Е.М.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

E-mail: aero@phmf.spbstu.ru

Тепловые трубы (ТТ) широко применяются в различных областях техники. В частности, они составляют основу современных систем обеспечения теплового режима (СОТР) космических аппаратов. При проектировании как собственно тепловых труб, так и использующих их системных устройств традиционно используются расчетные методики, основанные на методе сосредоточенных параметров и неизбежно дополняемые данными экспериментов, как правило, узко-ориентированных в силу чрезвычайного разнообразия конкретных технических решений. Успехи в развитии вычислительных технологий гидрогазодинамики и теплопереноса определяют постановку вопроса о развитии нового поколения расчетных методик. В докладе освещается опыт, полученный в последние годы в СПбПУ по разработкам и применению методов трехмерного (3D) численного моделирования теплопереноса в ТТ и сопряженных с ними телами. Рассматриваются разнообразные задачи для аксиальных и контурных тепловых труб (КТТ). В частности, исследуется роль неравномерного нагрева/охлаждения корпуса ТТ и образующейся «лужи» конденсата на интегральные характеристики аксиальной ТТ с пористым фитилем. Анализируются 3D эффекты в низкотемпературной ТТ в трубе сложной пространственной формы. Формулируется модельная трехмерная задача о радиационно-кондуктивном теплообмене в композитной сотовой панели со встроенными аксиальными ТТ, приводятся примеры решения. Представляется разработанная 3D вычислительная модель испарителя контурной тепловой трубы СОТР спутника TacSat-4, обсуждаются результаты проведенных параметрических расчетов (см. рисунок). Формулируется гибридная 1D/3D вычислительная модель для совместного анализа теплофизических процессов в конденсаторе КТТ (1D модель) и в радиаторной пластине (3D модель), приводятся результаты типовых расчетов.



Расчетная картина теплопереноса в двухфитильном испарителе КТТ

**ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ ТУРБУЛЕНТНОСТЬ:
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И НЕРЕШЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ,
НЕКЛАССИЧЕСКИЕ НАПРАВЛЕНИЯ**

Сон Э.Е.

Объединенный институт высоких температур РАН, Московский физико-технический институт
E-mail son.eduard@gmail.com

Гидродинамическая турбулентность – по-видимому, основная нерешенная проблема в гидродинамике. Успехи в развитии вычислительной техники, методов численного моделирования и средств диагностики дают возможность переосмысления классических результатов, формулировки нерешенных проблем и применения методов и теории к описанию неклассических направлений турбулентных течений, таких как воздействие внешних объемных сил гравитационной и электромагнитной природы, многофазных сред, протекания химических реакций и горения, влияние излучения, сверхзвуковых и гиперзвуковых потоков на турбулентность и обратного влияния турбулентности на неклассические турбулентные течения. В докладе рассмотрены турбулентные течения, начиная с простейшей двумерной турбулентности. В этом случае основные результаты при достаточно высоких числах Рейнольдса получены на основе низкодиссипативных численных методов. Полученные результаты явились основой построения теории турбулентности для двумерных течений и обобщения на трехмерные течения. В докладе рассмотрены спектры турбулентности и получены результаты для ряда задач неклассической турбулентности многофазных сред, горения, МГД, ЭГД и плазменной турбулентности, неньютоновской турбулентности при низких и высоких скоростях деформации потока.

ОСОБЕННОСТИ ТУРБУЛЕНТНОГО КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ЖИДКИХ МЕТАЛЛАХ

Фрик П.Г.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Московский энергетический институт
E-mail: frick@icmm.ru

Интерес к тепломассопереносу в жидких металлах вызван, в значительной мере, их применением в качестве теплоносителей в ядерных, термоядерных и космических энергетических установках. При этом, если в существующих реакторах на быстрых нейтронах традиционным теплоносителем стал натрий, то в перспективных ядерных и термоядерных реакторах рассматривается использование тяжелых металлов – свинца и сплава свинца и лития. Специфика жидкометаллических теплоносителей связана, в частности, с их высокой теплопроводностью, намного превышающей теплопроводность других типов теплоносителей, при сравнительно небольшой кинематической вязкости (малые числа Прандтля). Это означает, что молекулярная теплопроводность дает существенный вклад в перенос тепла не только в пристенном слое, но и в турбулентном ядре потока. В части проектирования реакторных установок чрезвычайно востребованными становятся результаты экспериментальных исследований свободной и смешанной конвекции металла в трубах и длинных сосудах, ориентированных под различными углами к направлению силы тяжести в присутствии и отсутствии магнитного поля. Результаты таких исследований могут быть использованы как при проектировании новых реакторных установок, так и при верификации расчетных кодов, используемых в атомной энергетике.

В докладе обсуждаются особенности экспериментальных исследований конвективного теплопереноса в жидких металлах и дается обзор результатов трех циклов экспериментов по турбулентной конвекции в жидких металлах. Первый цикл включает исследования свободной турбулентной конвекции натрия в длинных цилиндрах, наклоненных под различными углами к направлению силы тяжести. Эксперименты выполняются в ИМСС УрО РАН. Второй цикл работ, проводимый в МЭИ, касается исследований теплообмена в условиях, характерных для бланкетов токамаков, в которых существенно совместное влияние массовых сил различной природы – электромагнитной силы и силы плавучести. Исследована гидродинамика и теплообмен при протекании горячей ртути по каналам, помещенным в сильное магнитное поле и различно ориентированным по отношению к силе тяжести. Последний раздел относится не к задачам охлаждения энергоустановок, а к задачам цветной металлургии и касается исследований турбулентной конвекции магния в реакторе восстановления титана.

ПРИБЛИЖЕНИЕ МЕЛКОЙ ВОДЫ В СЛОИСТЫХ СДВИГОВЫХ ТЕЧЕНИЯХ НЕОДНОРОДНОЙ ЖИДКОСТИ С МАССООБМЕННОМ

Чесноков А.А.

Новосибирский государственный университет

E-mail: chesnokov@hydro.nsc.ru

Предложен метод построения математических моделей распространения нелинейных волновых возмущений в сдвиговом течении неоднородной жидкости на основе применения теории слоистой мелкой воды с турбулентным перемешиванием между слоями. С использованием данного подхода выведены и верифицированы новые одномерные гиперболические и дисперсионные модели описывающие распространение и обрушение волн. Полученные уравнения движения использованы для моделирования волн Фавра (формирование волнового или монотонного бора), описания эволюции профиля уединенной волны при выходе на пологий берег (рис. 1), а также для моделирования взаимодействия приповерхностного пузырькового слоя жидкости с внутренними волнами. Работа выполнена совместно с С.Л. Гаврилюком (Университет Экс-Марсель) и В.Ю. Ляпидевским (ИГиЛ СО РАН).

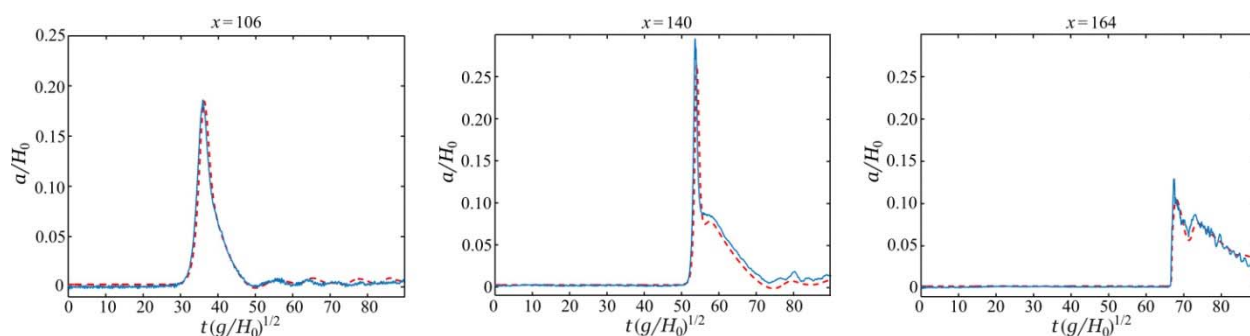


Рис. 1. Развертка по времени положения свободной поверхности при обрушении уединенной волны: сплошные линии – экспериментальные данные (Hsiao et al., 2008), пунктир – численные результаты.

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Абаимов Н.А.¹, Бурдуков А.П.², Бутаков Е.Б.², Осипов П.В.¹, Рыжков А.Ф.¹¹ ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», г. Екатеринбург, Россия² Институт теплофизики СО РАН им. С.С. Кутателадзе, г. Новосибирск, Россия

E-mail: nick.sum41@mail.ru

Уголь является самым распространённым видом ископаемого топлива на планете и занимает одно из первых мест в мировом топливно-энергетическом балансе. На сегодняшний день уголь используют либо для получения тепловой и электрической энергии, либо для производства химических веществ. Одной из наиболее перспективных энергетических технологий использования угля является парогазовая установка с внутрицикловой газификацией (ПГУ-ВЦГ). Основным элементом этой установки является газификатор, в котором происходит газификация угля – его превращение в горючий газ (синтез-газ). В качестве газа-реагента обычно выступают кислород или воздух. Кислород обладает большой реакционной способностью, поэтому подавляющая часть кислородных газификаторов имеют одну ступень реагирования. Воздух содержит 21 % кислорода, поэтому интенсивность протекания газификации низкая, что обычно компенсируют использованием двухстадийных газогенераторов.

Одним из наиболее эффективных методов управления процессом газификации является подача вторичных сред в камеру газификации. В качестве таких сред обычно выступают уголь, пар, диоксид углерода, продукты сгорания, синтез-газ и т.д. Подача вторичного угля или пара считается наиболее действенной и технически простой мерой. Использование угля в качестве вторичного агента позволяет приблизить коэффициент избытка воздуха к теоретически необходимому, а значит повысить химический КПД газификатора. С другой стороны, понижение коэффициента избытка воздуха снижает степень конверсии углерода, поэтому имеет большое значение способ и место подачи угля в газификатор. Например, многолетний опыт разработки и эксплуатации двухступенчатого воздушного газификатора МНИ подтвердил эффективность радиальной подачи вторичного угля в высоконагретые продукты неполного сгорания первичного угля. Подача пара используется для снижения температуры в реакционном пространстве (снятие перегрева) и повышения доли водорода в синтез-газе за счёт протекания реакции сдвига водяного газа.

На основе газификатора МНИ в УрФУ разработан паровоздушный двухступенчатый газификатор каменного угля для ПГУ-ВЦГ. Принципиально от исходной установки газификатор УрФУ подачей во вторую ступень вместе с вторичным углём высокотемпературного пара, а также дополнительным нагревом воздуха до 900°C.

Целью работы является сравнение влияния подачи угля и пара во вторую ступень поточных воздушных газификаторов на основные параметры работы установок.

Ввиду сложности и ресурсозатратности экспериментальных исследований сегодня они всё чаще заменяются численным моделированием. Наиболее эффективным является подход, объединяющий экспериментальные исследования и разномерное (0-, 1-, 2-, 3-D) расчётное моделирование.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1) проведены экспериментальные исследования воздушной и паровоздушной газификации с подачей во вторую ступень установки угля и пара, соответственно;

2) обработаны и сравнены результаты экспериментов с использованием нульмерного термодинамического и трёхмерного CFD-моделирования.

3) выполнено сравнение влияния конструктивных и режимных параметров на работу установок.

В качестве экспериментальных установок использованы два двухступенчатых газификатора Института теплофизики СО РАН с подачей во вторую ступень: угля – стенд 5 МВт; пара – стенд 1 МВт. Оба газификатора представляют собой цилиндрические изнутри футерованные сосуды, на одном конце которых находится улиточный завихритель, через который подаётся первичный уголь. Осесимметрично с камерой реагирования в торец завихрителя вставлена трубка подачи вторичного угля у стенда 5 МВт и пара у стенда 1 МВт.

Экспериментальные исследования проводились с различными коэффициентами избытка воздуха, расходами, температурами и точками подачи вторичных сред (угля и пара). Экспериментальными и расчётными методами установлено, что: в стенде 1 МВт (с паром) уменьшение расхода пара и отдаление точки его подачи от торца газификатора приводит к увеличению теплоты сгорания синтез-газа и снижению отношения H_2/CO в нём; в стенде 5 МВт (с вторичным углём) снижение расхода вторичного угля и отдаление точки его подачи от торца установки снижает теплоту сгорания синтез-газа и слабо влияет на отношение H_2/CO в нём.

Экспериментальные и расчётные исследования установки 1 МВт с подачей пара выполнены при финансовой поддержке РФФИ, грант № 16-38-50188 (Абаимов Н.А., Бурдуков А.П.).

Экспериментальные и расчётные исследования установки 5 МВт с подачей вторичного угля выполнены за счёт гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00524) (Абаимов Н.А., Осипов П.В., Рыжков А.Ф.).

НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ И ТЕПЛОПЕРЕНОС В СТЕКАЮЩЕЙ ПЛЕНКЕ ЖИДКОСТИ С ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ

Актершев С.П.¹, Алексеенко С.В.^{1,2}

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

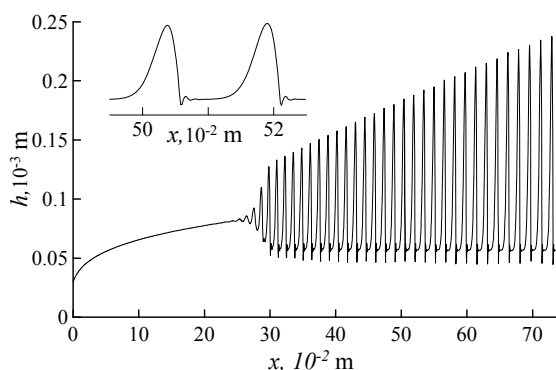
² Новосибирский государственный университет

E-mail: sergey-aktershev@mail.ru

Течения тонкой пленки жидкости реализуются в технологических установках различного назначения, таких как испарители, конденсаторы, абсорберы, дистилляционные колонны. В большинстве практически важных случаев течение пленки неустойчиво и на поверхности жидкости развиваются волны, которые существенно интенсифицируют теплоперенос. В [1] было показано, что поток массы на межфазной поверхности существенно влияет на устойчивость течения, причем конденсация оказывает стабилизирующее воздействие, а испарение дестабилизирует течение. Для описания нелинейных волн в жидкой пленке применена интегральная модель [2], модифицированная с учетом фазового превращения. В [3, 4] выведена система уравнений, на основе которой проведено численное моделирование волновых режимов течения неизотермической пленки с фазовым превращением. Численным методом исследовано влияние нелинейных волн на теплоперенос в ламинарной стекающей пленке жидкости при наличии фазового перехода (испарение, конденсация) на межфазной поверхности. Показано, что при умеренных значениях числа Рейнольдса в пленке развиваются естественные волны, обусловленные фазовым переходом и имеющие нерегулярный характер. Впервые изучена эволюция возбужденных волн с фиксированной частотой f в широком диапазоне частот. Возбужденные волны генерировались малым возмущением расхода на входе (амплитуда пульсации $Q_a = 0,01$), время счета выбиралось достаточно большим, чтобы волновой режим успел установиться на всем участке счета. Возбужденные волны имеют регулярный характер и развиваются значительно раньше, чем естественные волны. Было показано, что в определенном диапазоне частоты возбуждения волны существенно интенсифицируют теплоперенос по сравнению с естественными волнами.

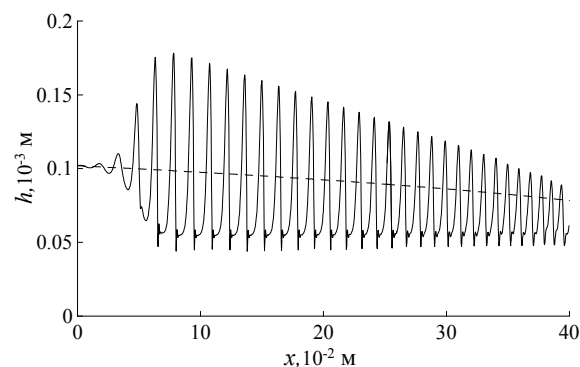
На рисунках 1 и 2 показана волновая поверхность пленки для частоты $f = 18$ Гц для случаев конденсации и испарения (здесь Re_m – число Рейнольдса на входе). Проведенные расчеты выявили следующие закономерности. Естественные и возбужденные волны на некотором расстоянии от входа быстро развиваются в нелинейные волны большой амплитуды. Во всех случаях возбужденные волны начинают развиваться на значительно меньшем расстоянии, чем естественные. Из рисунков видно, что амплитуда развитых возбужденных волн с увеличением расстояния падает в случае испарения и нарастает в случае конденсации. Интенсификация теплопереноса волнами происходит, в основном, из-за уменьшения толщины остаточного слоя между пиками. Среднее по времени локальное число Нуссельта определяется,

в основном, длиной участка между пиками, которая возрастает в процессе взаимодействия и слияния отдельных пиков. Развитие нелинейных волн в пленке очень чувствительно к внешнему периодическому воздействию. Таким образом, за счет периодического воздействия в определенном диапазоне частот можно



интенсифицировать процесс фазового превращения.

Рис. 1. Возбужденные волны частотой 18 Гц при $Re_m = 1$ в



пленке с конденсацией; сверху показана детально структура волн.

Рис. 2. Возбужденные волны частотой 18 Гц при $Re_m = 40$ в пленке с испарением; штриховой линией показан профиль гладкой пленки.

1. S.P. Aktershev, S.V. Alekseenko, Influence of condensation on the stability of a liquid film moving under the effect of gravity and turbulent vapor flow // Int. J. Heat Mass Transfer, 2005, V. 48, P. 1039–1052.
2. V.Ya. Shkadov, Wave-flow theory for a thin viscous liquid layer // Fluid Dynamics, 1968, V. 3, P. 12–15.
3. S.P. Aktershev, S.V. Alekseenko, Nonlinear waves and heat transfer in a falling film of condensate // Phys. Fluids., 2013, V. 25, 083602. P. 1–20.
4. Актершев С.П., Алексеенко С.В. Волновое течение испаряющейся пленки жидкости // Известия Томского политехнического университета, 2014, Т. 324, № 4, С. 6–13.

Работа поддержана РНФ (грант № 14-29-00093).

ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ПОТОКИ КРУПНЫХ КАПЕЛЬ В МЕЖЛОПАТОЧНЫХ КАНАЛАХ ПОСЛЕДНИХ СТУПЕНЕЙ ПАРОВЫХ ТУРБИН**Тищенко В.А.¹, Алексеев Р.А.¹, Гаврилов И.Ю.¹, Грибин В.Г.¹, Тищенко А.А.¹**¹ ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»E-mail: AlexeevRA@mpei.ru

Создание конденсационных паровых турбин ТЭС и АЭС, рассчитанных на высокую пропускную способность, является комплексной инженерной задачей. В первую очередь данная проблема относится к конструкторскому исполнению ЦНД. Большие окружные скорости периферийных венцов лопаток и наличие дискретной жидкой фазы в проточной части цилиндра накладывают достаточно строгие требования к надежности и эффективности работы последних ступеней. Образование влаги интенсифицирует ряд процессов, негативно сказывающихся на условиях течения влажно-парового потока. Подробные экспериментально-расчетные исследования показали, что эффективность работы последних ступеней определяется термодинамическими процессами фазового перехода (конденсации) на мелких каплях (размеры которых меньше 1 мкм). Эти явления достаточно хорошо изучены и поддаются моделированию с помощью современных CFD пакетов. В то же время на надежность лопаточного аппарата влияет эрозионный износ, вызываемый крупными каплями (размером более 10 мкм). Образование эрозионно-опасных капель является комплексным процессом, который реализуется за счет нескольких механизмов. На данный момент имеются только косвенные представления о характере формирования и движения крупных капель в межлопаточных каналах паровых турбин. Это накладывает ряд ограничений на возможности минимизации эрозионного износа и повышения надежности работы лопаточного аппарата. В настоящее время для этих целей используются системы сепарации влаги из проточной части, а также использование специальных наплавов на входных кромках рабочих лопаток. Однако, как показывают исследования и опыт эксплуатации конденсационных турбин, несмотря на всю эффективность этих методов, эрозионный износ остается одной из самых важных проблем, которую необходимо решить при проектировании перспективных конструкций ЦНД.

Исследования показывают, что на формирование полидисперсной среды в межлопаточном канале существенную роль играет геометрия поверхностей лопаток, так как она определяет условия взаимодействия капель с пленками и твердыми стенками [1]. Таким образом, дополнительным шагом по снижению негативных явлений, связанных с процессами эрозии может быть профилирование лопаточного аппарата с целью управления капельными потоками. Этой теме посвящена данная работа.

Для реализации поставленной задачи использовались экспериментальные данные о полях скоростей частиц жидкой фазы в межлопаточном канале, полученные с помощью системы лазерной диагностики «ПОЛИС» с применением метода PTV. Эта информация является достаточно подробной: при рассмотрении каждого из режимов удавалось детектировать суммарно до 20е6 капель в исследуемой области.

Пост-обработка этих результатов позволила определить места образования вторичных капель после взаимодействия первичной влаги с поверхностями лопаток и водяных пленок, выявить характерные траектории потоков крупных капель в межлопаточных каналах.

Имеющаяся информация о распределении характеристик эрозионно-опасных капель в межлопаточном канале была использована для формулирования математической модели движения капель в проточной части паровой турбины. В ее основе лежит уравнение движения сферической частицы под действием силы аэродинамического сопротивления. При этом введена дополнительная поправка на сжимаемость среды. Для учета механизма взаимодействия капли с твердой стенкой и определения дальнейшего сценария развития процесса (отражение капли, дробление, оседание на поверхности) была использована модель Мундо [2]. Свободные параметры этой модели были получены на основе сопоставления расчетных и описанных выше экспериментальных данных.

Удалось добиться качественного совпадения расчетных и экспериментальных данных. Это позволило провести оптимизацию геометрии профиля сопловой лопатки с целью управления капельными потоками. Для этого использовалась адаптивная методика параметрического представления формы профиля [3]. Основной задачей при оптимизации геометрии лопатки было увеличение угла между нормалью к поверхности и направлением движения потока капель. Это снижает энергию соударения, что, как показывают исследования, приводит к осаждению большей части массы капли на поверхности лопатки.

На основе данного подхода было рассмотрено несколько вариантов модифицированных геометрий профилей. Численное моделирование подтвердило эффективность представленного метода по управлению потоками эрозионно-опасных капель в межлопаточных каналах турбин.

1. М.Е. Дейч Газодинамика решеток турбомашин // М.: Энергоатомиздат, 1996. 300 с.
2. C. Mundo, M. Sommerfeld., C. Tropea. Droplet-Wall Collisions: Experimental Studies of the Deformation and Breakup Process // International Journal of Multiphase Flow. 1995. V. 21(2). P. 151–173.
3. Gribin V.G. et. al. Turbine blade profile design using Bezier curves // Proc. 12th European turbomachinery conference. Stockholm, 2017. Paper ETC2017-195.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 16-19-10484)

THE VAPOR-GAS NUCLEATION RESEARCH

Anisimov M.P.^{1,3}, Hopke P.K.^{1,2}¹Aerosol Technologies Laboratory, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk²Clarkson University, Box 5708, Potsdam, NY³Nanoaerosol Research Lab, TDISIE SB RAS Novosibirsk

E-mail: anisimovmp@mail.ru

Currently, the most significant problem in nucleation is the correspondence between experimental data and theoretical predictions of nucleation rate values. Theoretical results generally are quite reasonable for sufficiently low vapor nucleation rates where the capillary approximation is applicable (Anisimov, 2003).

However, vapor-gas nucleation theory can produce values that deviate from the experimental results by several orders of magnitude. Experiments using different devices also show significant inconsistencies in the measured rates (for example, see Brus et al., 2005). The advantages and current problems of the vapor-gas nucleation experiments are discussed briefly and a view of the future studies is presented here. During the past three decades, the effects of pressure and various carrier gases on homogeneous nucleation have been studied carefully. Classical nucleation theory assumes that the carrier gas only maintains the temperature equilibrium of the clusters with the ambient media. Frank and Hertz (1956) first observed a gas-pressure effect. Gas-pressure effects are discussed by Anisimov and Vershinin (1988, etc) who found a positive gas-pressure effect and a gas-nature effect at gas pressures from 0.10 to 0.30 MPa. They concluded (using the nucleation theorem) that carrier gas molecules were involved in the critical embryos. Heist and co-workers (1994; 1995) have reported effects of pressure and carrier gas nature on the nucleation rates for a series of short-chain alcohols. Other results have supported a dependence of the nucleation rate on the nature and total pressure of the carrier gas (Luijten and van Dongen, 1999; Anisimov et al., 2000; Lihavainen and Viisanen, 2001). From other side Viisanen et al. (1993); Viisanen and Strey (1994) found no carrier gas influence on nucleation rate.

To test the accuracy of experimental techniques, it is important to have a standard system that can be measured over a range of nucleation conditions. The n-pentanol-helium system was proposed in Prague in 1995 as a standard. The multiple results were collected and compared (Anisimov et al., 2000) and a reference equation was proposed for the nucleation rate of n-pentanol-helium as a practical test of measurement systems for total pressures from 0.10 to 0.30 MPa. The problem of a nucleation standard can only be solved when consistent results have been independently obtained using different experimental schemes. We suggest that vapor-gas nucleation rates be represented by a surface instead of the single lines that are used for most current presentations of the isothermal nucleation rate data in vapor-gas systems.

Several groups made comparative measurements of nucleation rates (Anisimov et al., 1994; Wilck et al., 1998; Brus et al., 2005, etc.) The nucleation rates of n-butanol in helium using both an FDC (Hyvarinen et al., 2004) and an expansion chamber (Strey et al., 1986)

show differences of 4-5 orders of magnitude. The data from the different systems can cross each other in some cases. The origin of these data discrepancies can be better understood through the consideration of nucleation rate surfaces (Anisimov et al., 1998; 2000). It is plausible to think that different experimental systems have the inconsistent trajectories along the nucleation rate surfaces when the vapor-gas system is treated as binary system. Several results, for example, Anisimova et al. (2001) etc illustrate that high-pressure techniques are needed to study multi-channel nucleation.

It is supposed that several new measuring systems will be created in the frame of the Russian Ministry of Science & Education grant under Contract № 14.Z50.31.0041 issued by February 13th of 2017 to provide the nucleation studies for several practical applications.

1. Anisimov, M.P. (2003). Russian Chemical Reviews, 72, 591 – 628.
2. Anisimov, M.P. & Vershinin, S.N. (1988). Lecture Notes in Physics, 309, 393 – 396.
3. Anisimov, M.P. & Vershinin, S.N. (1990). Journal of Aerosol Science, 21 (1), 11 – 14.
4. Anisimov, M.P., Hameri, K., & Kulmala, M. (1994). Journal of Aerosol Science, 25, 23 – 32.
5. Anisimov, M.P., Hopke, P.K.; Rasmussen, D.H., & Pinaev, V.A. (1998). J Chem Phys 109, 1435–1444.
6. Anisimov, M.P., Koropchak, J.A., & Timoshina, L.V. (2000). J. Chem. Phys., 112, 9917 – 9928.
7. Anisimov, M.P., Hopke, P.K., & Shvets, I. (2000). J. Chem. Phys., 113, 1971 – 1975.
8. Anisimova, L., Hopke, P.K., & Terry, J. (2001). J. Chem. Phys., 114, 9852 – 9855.
9. Brus, D., Hyvarinen, A., Zdimal, V., & Lihavainen H. (2005). J. Chem. Phys., 122, 214506–21514.
10. Fladerer, A. and Strey, R. (2006). J. Chem. Phys., 124, 164710 – 164715.
11. Frank, J. & Hertz, H. (1956). Zeitschrift fur physik, 143, 559 – 590.
12. Heist R.H., Ahmed, J. & Janujua, M. (1994). J. Phys. Chem., 98, 4443 – 4453.
13. Heist R.H., Ahmed, J. & Janujua, M. (1995). J. Phys. Chem., 99, 375 – 383.
14. Hyvarinen, A.-P., Lihavainen, H., & Kulmala, M. (2004). J. Chem. Phys., 120, 11621 – 11633.
15. Lihavainen, H. & Viisanen, Y. (2001). J. Phys. Chem., 105, 11619 – 11629.
16. Luijten, C.C.M. & van-Dongen, M.E.H. (1999). J. Phys. Chem., 111, 8524 – 8534.
17. Strey, R., Wagner, P.E., & Schmeling, T. (1986). J. Chem. Phys., 84(4), 2325 – 2335.
18. Van Remoortere, P., Heath, C., Wagner, P., & Strey, R. (1996). Proceedings of the 14-th ICNAA, Helsinki, Eds by M. Kulmala and P. Wagner (pp. 256 – 259). Pergamon: Oxford.
19. Viisanen, Y. & Strey, R. (1994). J. Chem. Phys., 101, 7835 – 7843.
20. Viisanen, Y., Strey, R., & Reiss, H. (1993). J. Chem. Phys., 99, 4680 – 4692.
21. Wilck, M., Stratmann, F., & Kulmala, M. (1998). J. Aerosol Sci., 29, 899 – 911.

Acknowledgements:

Research is supported by grant of the Russian Ministry of Science & Education under Contract № 14.Z50.31.0041 issued by February 13th of 2017.

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ МИКРОКАНАЛЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НАНОЖИДКОСТИ НА ОСНОВЕ SiO₂

Анискин В.М.^{1,2}, Рудяк В.Я.³

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

² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе,
630090, Россия, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 1

³ Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет,
630008, Россия, Новосибирск, ул. Ленинградская, 113

E-mail: aniskin@itam.nsc.ru

Использование наножидкостей для повышения теплообменных свойств различных технических систем и устройств весьма перспективный способ повышения их эффективности. В макротечениях в ламинарном режиме коэффициент теплоотдачи наножидкостей в общем случае существенно превосходит соответствующие значения для базовой жидкости [1–4]. Во многих приложениях наножидкости планируется использовать для охлаждения различных микросистем. Наножидкость, однако, достаточно сложная двухфазная система, теплофизические свойства которой не описываются классическими теориями. Экспериментальное изучение их микротечений поэтому совсем нетривиальная задача, поскольку необходим еще и соответствующий инструментарий.

В данной работе с этой целью создан специальный стенд. Нагрев рабочего участка (микроканала) осуществлялся непосредственно пропусканием электрического тока через микроканал. Чтобы при этом исключить влияние внешнего конвективного теплообмена на результаты опытов рабочий участок помещался в вакуумную камеру, воздух в которой откачивался до давления $2 \cdot 10^{-2}$ мм ртутного столба. В боковой стенке камера имела отверстия для откачки воздуха, измерения вакуума, подачи и отвода рабочей жидкости, а также была снабжена шестью вакуумными разъемами по семь контактов в каждом.

Для получения достоверных данных о местном коэффициенте теплоотдачи необходимо было на входе в нагреваемый микроканал иметь профиль скорости, соответствующий развитому течению. С этой целью рабочий участок был выполнен составным, он имел подготовительный и нагреваемый элементы. Нагреваемый участок представлял собой цилиндрический канал из нержавеющей стали. Эксперименты выполнялись на двух каналах с внутренним диаметром 358 и 180 мкм. Величина абсолютной шероховатости внутренней поверхности канала не превышала 8 мкм.

Температуры жидкости на входе в рабочий нагреваемый участок измерялась с помощью хромель-алюмелевой термопары (L-типа), она имела толщину около 20 мкм и планарный размер 80×80 мкм. Температура нагреваемого рабочего участка измерялась одиннадцатью термопарами, расположенными по всей его длине. Еще одна термопара размещалась непосредственно внутри коллектора на выходе канала. Наконец на расстоянии около одного калибра от среза стального канала и поперек его сечения устанавливалась еще одна термопара толщиной 20 мкм и планарным размером 60×300 мкм. С ее помощью из-

мерялась средняя температура на выходе из нагреваемого рабочего участка.

Тестирование установки было проведено на измерениях коэффициента теплоотдачи при течении дистиллированной деионизированной воды.

В данной работе изучен коэффициент теплоотдачи наножидкости на основе дистиллированной воды с частицами диоксида кремния со средним размером 25 нм, их объемная концентрация в наножидкости варьировалась от 0.25 до 1%. Наножидкость получалась обычным двухшаговым методом. Чтобы разрушить конгломераты наночастиц суспензии подвергались обработке ультразвуком в ванне "Сапфир" в течение 45 минут. Перед каждым экспериментом наножидкость снова дополнительно обрабатывалась в ультразвуковой ванне. Расход жидкости, как и для чистой воды, менялся от 3 до 10 мл/мин.

Установлено, что коэффициент теплоотдачи наножидкостей существенно превосходит соответствующее значение для базовой жидкости. Уже однопроцентная наножидкость повышает его примерно на 60% по сравнению с водой. При рассмотренных небольших концентрациях наночастиц превышение коэффициента теплоотдачи пропорционально концентрации частиц. Поэтому с ее увеличением превышение коэффициента теплоотдачи будет расти. Это соответствует и данным работ [3, 4], которые были получены в микроканалах с внутренним диаметром почти в двадцать и сорок раз меньшим.

С ростом расхода коэффициент теплообмена также увеличивается. Показано, что двукратное превышение среднего относительного коэффициента теплоотдачи следует ожидать уже при расходе около 10.3 мл/мин, а трехкратного – при расходе около 12.6 мл/мин. При этом течение все еще остается ламинарным.

Список литературы:

1. Гузей Д. В., Минаков А. В., Рудяк В. Я., Дектерев А. А. Измерение коэффициента теплоотдачи наножидкости на основе оксида меди в цилиндрическом канале // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. № 5. С. 34–42.
2. Luna I. Z., Chowdhury A. M. S., Gafur M. A., Khan R. A. Measurement of forced convective heat transfer coefficient of low volume fraction CuO-PVA nanofluids under laminar flow condition // American J. of Nanomaterials. 2015. V. 3. No. 2. P. 64–67.
3. Минаков А. В., Рудяк В. Я., Гузей Д. В., Лобасов А. С. Измерение коэффициента теплоотдачи наножидкости на основе воды и частиц оксида меди // ТБТ. 2015. Т. 53. № 2. С. 256–263.
4. Minakov A. V., Lobasov A. S., Guzei D. V., Pryazhnikov M. I., Rudyak V. Ya. The experimental and theoretical study of laminar forced convection of nanofluids in the round channel // Applied Thermal Engineering. 2015. V. 88. P. 140–148.

ГАЗОДИНАМИКА РЕАГИРУЮЩИХ ГАЗОВ В ВИХРЕВОЙ ТОПКЕ**Ахметшина А.И., Павлов Г.И., Сабирзянов А.Н., Тихонов О.А.**

Казанский национальный исследовательский технический университет –КАИ им. А.Н.Туполева

E-mail: Pavlov16@mail.ru

Из литературы известно, что для полного реагирования двух газов (горючего и окислителя) необходимо выполнить три основных условия: стехиометрическое соотношение реагирующих газов, качественное перемешивание и обеспечение охлаждения продуктов сгорания без «закалки». Из выше перечисленных условий сложнее организовать качественное смесеобразование. Этот физический процесс требует дополнительных затрат энергии потока. В данной работе приведены результаты экспериментально-теоретических исследований газодинамики реагирующей газовой смеси в вихревой топке. Расчетная схема топки включает в себя две зоны реагирования горючих компонентов: первая зона – зона генерации горючих газов, состав которых постоянен; вторая зона топки – зона гомогенной реакции горения. Ввиду сложности физико-химических процессов, происходящих в первой зоне задача по определению необходимых параметров практически не решается. Методы расчета газодинамических параметров в гомогенных реагирующих смесях в достаточной степени апробированы. Решение задач газодинамики во второй зоне является классическим и успешно может быть решено с использованием существующих пакетов программ. В качестве исходных данных были использованы состав генераторных газов на выходе из первой зоны и соответствующие параметры потока. Эти параметры определялись в результате термодинамического расчета при определенных допущениях. Адекватность результатов термодинамического расчета, а также результатов вычислительных экспериментов во второй зоне проверялась экспериментами. Для проведения опытов разрабатывался огневой стенд. Огневой стенд включал в себя модель вихревой топки и систему измерения параметров газов (скорости, температуры, состава газов). Вихревая топка имела две зоны реагирования горючих компонентов с воздухом. В первой зоне горение горючего вещества происходило в слое на колоснике. В качестве горючего использовались шпалы в виде щепы. Для этой зоны характерны такие сложные физико-химические процессы, как нагрев и термическое разложение древесной щепы, пропиточных веществ, частичное сгорание газовой фазы и т.п. Эти явления происходят за счет тепла, выделяющегося при сжигании части газовой фазы и углей. Воздух в колосниковую часть топки подводился в количестве, необходимом для

горения небольшой части горючих газов и дожигания твердого остатка (углей). Далее газовая смесь, состоящая из горючих газов термического разложения шпал и продуктов сгорания углей, поступала во вторую зону, расположенную выше. В эту же зону по разным поясам подводился вторичный воздух. Воздух подавался в виде отдельных струй под разными углами к радиусу, тем самым формировался вихревой поток разной структуры. Воздух в топочное пространство подавался вентилятором. Система подачи воздуха позволяла распределять воздух по зонам горения по заданной программе. Во вторую зону подвод воздуха осуществлялся по различным конструктивным схемам: радиально, тангенциально и хордально. Для реализации этих схем изготавливались воздушные блоки в виде цилиндрических коллекторов с воздушными соплами, составляющими боковую стенку вихревой топки. Конструкция топки позволяла менять положение блоков друг относительно друга и формировать 6 вариантов подвода воздуха. В корпусе топки располагались технологические люки для ввода зондов измерительных приборов в исследуемое пространство топки.

Численными исследованиями установлено, что направление подачи воздушных струй в горючий газовый поток оказывает сильное влияние на процессы горения в вихревой топке. Определены оптимальные направления подачи воздушных струй по отношению к направлению движения продуктов термического разложения древесных отходов. Разработанная математическая модель позволяет моделировать образование CO, NO, сернистых соединений, а также полноту сгорания горючих газов в зависимости от расхода, места и схемы подачи воздушных струй в зону реагирования. Определены оптимальные условия, при которых концентрация вредных веществ на выходе из топки и градиент изменения температуры в топочном пространстве минимальны. Экспериментальные результаты подтверждают результаты численных исследований.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВМЕСТНОГО ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ПЛЕНКЕ ЖИДКОСТИ, ДВИЖУЩЕЙСЯ ПО НАКЛОННОЙ СТЕНКЕ, С УЧЕТОМ КАСАТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА МЕЖФАЗНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Барташевич М.В., Власенко М.Г., Дехтярь Р.А.

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

E-mail: bartashevichmv@gmail.com

Сопряженные процессы тепло-массопереноса имеют место в различных устройствах энергетики и химической технологии. Аналитические решения простейших задач о взаимосвязанном тепло-массопереносе при абсорбции на свободных поверхностях различной геометрии приведены в [1]. Впервые теоретическое описание процессов совместного тепло-массопереноса при абсорбции сделано в работах [2-4]. В [3,4] представлены аналитические решения задачи о неизотермической пленочной абсорбции в предположении постоянства толщины пленки. В работе [5] исследован тепло-массоперенос на начальном участке стекающей под напором осесимметричной полубесконечной пленки. В [6] рассмотрено численное решение задачи об абсорбции на вертикальной пленке раствора бромистого лития при условии параболического профиля скорости. В [7] представлено численное решение задачи об абсорбции на вертикальной трубе с учетом эффектов Дюфура и Соре. В данной работе численно исследуются сопряженные процессы тепло-массопереноса при абсорбции водяного пара стекающей по наклонной поверхности жидкой пленкой раствора бромистого лития. В процессе неизотермической абсорбции температура и концентрация на поверхности пленки жидкости заранее неизвестны и взаимосвязаны. Предложенная математическая модель учитывает влияние температурного и концентрационного градиентов поверхностного натяжения на гидродинамику процесса. Тепло-массоперенос при пленочной абсорбции описывается уравнениями теплопроводности и диффузии:

$$u \partial T / \partial x = a \partial^2 T / \partial y^2, \quad (1)$$

$$u \partial C / \partial x = D \partial^2 C / \partial y^2, \quad (2)$$

где a – коэффициент температуропроводности, м²/с, D – коэффициент диффузии, м²/с. Профиль скорости в пленке имеет вид

$$u = (g \sin \alpha / 2\nu) (2yh - y^2) + y\varphi / \mu, \quad (3)$$

где $\varphi = (\partial \sigma / \partial T)(\partial T / \partial x) + (\partial \sigma / \partial C)(\partial C / \partial x)$.

Граничные условия на входе при $x = 0$:

$$T = T_i, C = C_i.$$

На межфазной поверхности при $y = h$, аналогично [1], имеет место состояние равновесия системы раствор – пар:

$$C_a = f(T_a), -\lambda \partial T / \partial y = -\chi \partial C / \partial y.$$

Здесь $\chi = L\rho D / (1 - C_i)$, L – скрытая теплота фазового превращения, Дж/кг; ρ – плотность раствора, кг/м³; λ – теплопроводность, Вт/(мК). Данное условие равновесия связывает равновесную температуру T_a с концентрацией C_a . На стенке при $y = 0$:

$$\lambda \partial T / \partial y|_{y=0} = q_w, \partial C / \partial y|_{y=0} = 0.$$

В безразмерной форме система уравнений, описывающая процесс тепло-массопереноса в пленке, имеет следующий вид:

$$\nu \partial \theta / \partial \xi = \partial^2 \theta / \partial \eta^2, \nu \partial \gamma / \partial \xi = Le \partial^2 \gamma / \partial \eta^2, \quad (4)$$

где θ – безразмерная температура, γ – безразмерная концентрация абсорбируемого вещества в растворе, ξ – безразмерная продольная координата, η – безразмерная поперечная координата, $\nu = (\eta(2+r) - \eta^2)$, $r = 2\varphi / (\rho g h \sin \alpha)$, $Le = D/a$ – число Льюиса. На входе при $\xi = 0$: $\theta = 0$, $\gamma = 0$. На стенке при $\eta = 0$: $\partial \theta / \partial \eta|_{\eta=0} = \bar{q}_w$, $\partial \gamma / \partial \eta|_{\eta=0} = 0$. Условия на межфазной поверхности при $\eta = 1$ и при условии линейности функции $f(T) = k_1 - k_2 T$: $\theta = \theta_a$, $\gamma = \gamma_a$ и $\theta_a + \gamma_a = 1$ и условие для потока массы:

$$KuLe((C_s - C_i) / (1 - C_i)) \partial \gamma / \partial \eta = \partial \theta / \partial \eta,$$

где $Ku = L / (C_p(T_s - T_i))$ – число Кутателадзе, L – скрытая теплота фазового перехода, Дж/кг, C_p – удельная теплоемкость раствора, Дж/(кгК), $C_s = f(T_i)$, $C_i = f(T_s)$, $T_i < T_s$, $C_i < C_s$. В работе проводились численные расчеты конечноразностным методом. Рассчитаны распределения температуры и концентрации для различных температурных режимов пластины, характеризующие параметры процесса, проведена оценка влияния термоконцентрационных сил на гидродинамику и процессы тепло-массопереноса.

Список литературы

1. Накоряков В.Е., Григорьева Н.И. Неизотермическая абсорбция в термотрансформаторах. Новосибирск: Наука, 2010.
2. Chiang S. H., Toor H. L. Gas absorption accompanied by a large heat effect and volume change of the liquid phase // A.I.Ch.E. J. 1964. V.10, N.3. P.398–402.
3. Grigorieva N. I., Nakoryakov V. E. Exact solution of combined heat- and mass transfer problem during film absorption // J. Engineering Physics and Thermophysics. 1977. V. 33, N 5. P.1349–1253.
4. Grossman G. Simultaneous heat and mass transfer in film absorption under laminar flow // Int. J. Heat Mass Transfer. 1983. V. 26, Is.3. P. 357–371.
5. Nakoryakov V.E., Grigoryeva N.I., Bartashevich M.V. Heat and mass transfer in the entrance region of the falling film: absorption, desorption, condensation and evaporation // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2011. V. 54, Is. 21–22. P. 4485–4490.
6. Bo S., Ma X., Chen H., Lan Z. Numerical simulation on vapor absorption by wavy lithium bromide aqueous solution films // Heat and Mass Transfer. 2011. V. 47, Is. 12. P. 1611–1619.
7. Hosseinnia S., Naghashzadegan M., Kouhikamali R. Numerical study of falling film absorption process in a vertical tube absorber including Soret and Dufour effects // Int. J. Thermal Sciences. 2017. V.114. P.123–138.

Работа выполнена при поддержке гранта МК-6384.2016.8.

Повышенный интерес к течениям жидкости с поверхностями раздела, вызван интенсивным развитием наукоёмких технологий, использующих жидкости в качестве рабочих сред, и экспериментальных методов исследования особенностей совместных конвективных течений жидкости и спутных потоков газа. На характер таких течений оказывают влияние расходы рабочих сред, температурный режим на границах области течения, геометрические размеры системы и физико-химические свойства жидкостей (жидкости и газа) [1]. С целью совершенствования существующих опытных методик и разработки новых экспериментов необходимо проводить тщательное теоретическое исследование степени влияния названных факторов на топологию и температурные характеристики течения, а в условиях, когда течение сопровождается испарением или конденсацией через межфазные границы, ещё и интенсивность испарения на границе раздела. Одним из важнейших условий корректной работы подобных систем является устойчивость основного состояния жидкости. Изучение характеристик устойчивости двухслойных течений позволяет определить условия, обеспечивающие эффективное подавление критических возмущений.

Один из быстрых и продуктивных способов изучения характеристик таких течений – математическое моделирование процессов конвекции на основе точных решений. В многопараметрических задачах именно точное решение позволяет изучить степень влияния каждого отдельного фактора и их взаимных комбинаций, оценить адекватность математической модели, предсказать на качественном уровне динамику течений или исход экспериментов.

Одним из решений, позволяющим описывать течения с поверхностями раздела в областях, на границах которых приложен продольный градиент температуры, является решение Остроумова-Бириха [2] уравнений свободной конвекции. Это решение может быть обобщено на случаи произвольной ориентации системы относительно силы тяжести [3], течений с испарением/конденсацией на межфазной границе [4] и трёхмерных течений [5, 6]. Для задач с фазовым переходом на границе раздела «жидкость-газ» решения учитывают влияние эффектов термодиффузии и диффузионной теплопроводности в парогазовой среде. В зависимости от доминирующих механизмов, определяющих структуру течений в двухслойной системе, можно выделить течения Пуазейлевского, термокапиллярного и смешанного типов [3, 7]. При этом при классификации режимов следует учитывать не только топологию течения (профиль скорости), но и распределение температуры в системе. В условиях, когда имеет место фазовый переход за счёт испаре-

ния через границу раздела, приповерхностный слой жидкости может охлаждаться, что приводит к потенциально неустойчивой плотностной стратификации в жидком слое и к изменению поверхностного натяжения. Кроме того, при испарении/конденсации внутри слоёв рабочих сред могут возникать термоклины, формирование которых служит дополнительным механизмом неустойчивости. Из проведенного анализа ясно, что решение Остроумова-Бириха и его аналоги (обобщения) описывают существенно разные типы течений, поэтому важно исследовать характеристики устойчивости всех полученных режимов.

В рамках линейной теории изучено влияние гравитации, характера тепловой нагрузки на границах канала (нагрев/охлаждение), геометрии системы, процессов испарения на тип возникающих неустойчивостей в зависимости от параметров задач. Установлено, что возмущения могут приводить к возникновению в жидкости термокапиллярных и вихревых структур различной природы. В условиях, когда имеет место испарение/конденсация, при потере устойчивости могут формироваться высокочастотные колебательные режимы, и, кроме того, возможны сосуществование термокапиллярного и конвективного механизмов неустойчивости и смена типа наиболее опасных возмущений. Получены карты режимов неустойчивости в пространстве параметров соответствующих задач для всех рассмотренных двухслойных течений в плоских каналах, дающие возможность определить критические формы возмущений и способы стабилизации течений.

1. Lyulin Y., Kabov O. Evaporative convection in a horizontal liquid layer under shear-stress gas flow // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2014. V. 70. P. 599-609.
2. Бирих Р.В. О термокапиллярной конвекции в горизонтальном слое жидкости // *ПМТФ*. 1966. № 3. С. 69-72.
3. Бекежанова В.Б. Устойчивость неизотермических жидкостей в различных моделях конвекции: Дис. д-ра физ.-мат. наук: 01.02.05. Красноярск, 2015. 268 с.
4. Гончарова О.Н., Резанова Е.В. Моделирование двухслойных течений с учетом испарения на границе раздела на основе точных решений // *ПМТФ*. 2014. Т. 55, № 2. С. 68-79.
5. Goncharova O.N., Kabov O.A., Pukhnachov V.V. Solutions of special type describing the three-dimensional thermocapillary flows with an interface // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2012. V. 55. P. 715-725.
6. Goncharova O.N., Kabov O.A. Investigation of the two-layer fluid flows with evaporation at interface on the basis of the exact solutions of the 3D problems of convection // *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. V. 754. No. 032008. P. 1-6.
7. Bekezhanova V.B., Goncharova O.N. Stability of exact solutions describing two-layer flows with evaporation at the interface // *Fluid Dynamics Research*. 2016. V. 48. No. 6. P. 061408.

Работа частично поддержана РФФИ (грант № 17-08-00291).

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ВЕЛИЗИ ФРОНТА УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ

А.С. Барышников¹, И.В. Басаргин¹, Н.О. Безверхний², С.В. Бобашев^{1,2}, Н.А. Монахов¹,
П.А. Попов¹, В.А. Сахаров¹, М.В. Чистякова¹

¹Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

²Санкт-Петербургский государственный университет Петра Великого, Санкт-Петербург

E-mail: nm1988@mail.ru

В последнее время активно исследуются возможности использования низкотемпературной плазмы для управления сверхзвуковыми потоками и модификации аэродинамических характеристик летательных аппаратов [1-3]. В данной работе экспериментально исследовано взаимодействие ударной волны с плазмой поперечного тлеющего разряда. Разряд зажигался между двумя коническими электродами, расположенными на расстоянии 100 мм друг от друга в рабочей камере в воздушной среде при давлении 4 кПа. Разрядный ток был равен 1 А при напряжении между электродами 680 В. Ударная волна генерировалась при помощи электроразрядной ударной трубы, скорость ударной волны при входе в плазму была равна 1000 м/с, что соответствовало числу Маха $M=3$. Для определения параметров плазмы в нестационарном газодинамическом процессе был использован двойной электрический зонд.

В данной работе был надежно подтвержден эффект снижения проводимости плазмы до прихода ударной волны в точку измерения, ранее обнаруженный и описанный в [4-7]. Измерения концентрации заряженных частиц в различных точках разрядной плазмы показали, что это снижение происходит одновременно во всем объеме плазмы. В результате исследования показано, что перед фронтом ударной волны в неравновесной плазме наблюдается немонотонное изменение концентрации ионов со значительными по величине локальными экстремумами, тогда как за фронтом ударной волны плотности ионов изменяется плавно в отличие от изменения плотности нейтральной компоненты.

Физический механизм, определяющий сложный характер изменения концентрации ионов в окрестности фронта ударной волны, возможно, связан с неравновесным состоянием плазмы тлеющего разряда и требует дальнейшего исследования.

1. P. Bletzinger, B.N. Ganguly, D. Van Wie, and A. Garscaden. Plasmas in high speed aerodynamics // J. Phys. D: Appl. Phys. 38 (2005) R33-R57.
2. Adamovich I.V. Plasma Dynamics and Flow Control Applications // Encyclopedia of Aerospace Engineering. John Wiley & Sons Ltd, 2010.
3. Starikovskiy, N. Aleksandrov. Nonequilibrium Plasma Aerodynamics // Aeronautics and Astronautics, pp. 55-96, 2011, InTech.
4. A.S. Baryshnikov, I.V. Basargin, S.V. Bobashev, N. A. Monakhov, P.A. Popov, V. A. Sakharov, and M. V. Chistyakova. Peculiarities of Interaction of a Shock Wave with Gas Discharge Plasma // Technical Physics Letters, Vol. 41, No. 8, pp. 753-755.
5. Basargin, I. V, and Mishin, G. I. Probe Studies of Shock Waves in the Plasma of a Transverse Glow Discharge // Soviet Physics — Technical Physics Letters, Vol. 11, No. 11, 1985, pp. 535-538.
6. Ershov, A. P., Klishin, S. V, Kuzovnikov, A. A., Ponomareva, S. E., and Pyt'ev, Y. P. Application of the Reduction Method to the Microwave Interferometry of Shock Waves in Weakly Ionized Plasma // Soviet Physics — Technical Physics, Vol. 34, No. 8, 1989, pp. 936-937.
7. Baryshnikov, A.S., Basargin, I.V., Bobashev, S.V. et al. Study of the Effect of Decrease in the Conductivity Ahead of a Shock Wave in a Glow-Discharge Plasma // J. Eng. Phys. Thermophys., 2016, Vol. 89, No.3, pp.565-568.

Работа поддержана РФФИ (грант №15-08- 6280).

ФОРМИРОВАНИЕ КАВИТАЦИОННОГО КЛАСТЕРА В ОКРЕСТНОСТИ КВАЗИ-ПУСТОГО РАЗРЫВА

Е.С. Большакова^{1,2}, В. К. Кедринский¹

¹Институт гидродинамики имени М.А. Лаврентьева СО РАН

²Новосибирский Государственный Университет

E-mail: kedr@hydro.nsc.ru

Согласно физико-техническим данным начальное состояние магмы в канале вулкана – это расплав, насыщенный газом под высоким давлением. Раскрытие канала приводит к падению давления, к нарушению равновесного состояния системы. Возникает волна разрежения, за фронтом которой наблюдается интенсивное развитие пузырьковой кавитации. Это может привести к развитию в потоке разрывов и, как следствие, к регулярному выбросу мощных взрывных извержений. Однако, согласно [1], разрыв на достаточной большой глубине не обязательно сопровождается взрывным выбросом. Тем не менее, вопрос несомненно представляет интерес и практически не исследован. Можно использовать метод гидродинамических ударных труб [2,3], среди которых наиболее интересны импульсные ГУТ, основанные на использовании энергии, накопленной в батарее высоковольтных конденсаторов. При замыкании батареи на спираль из плоской проводящей катушки создается мощный магнитный поток. На спираль размещается кювета с водой и проводящим дном в виде мембраны – схема готова полностью к работе, если электрическая схема соответствует аperiodическому разряду. Движение мембраны в воде, генерирующее УВ, составляет всего несколько микросекунд, но после ее возвращения в исходное положение в силу инерции жидкость продолжает движение вверх – на поверхности мембраны формируется квази-пустой разрыв (см. Рис.1, $t = 1.5$ мс).

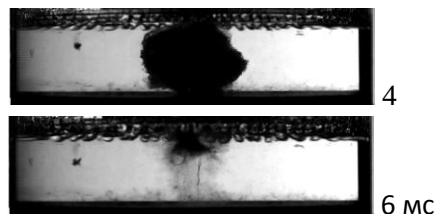
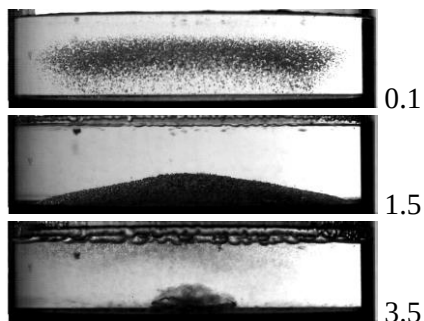


Рис. 1 УВ-нагружение слоя жидкости толщиной 3 см, радиус мембраны 6 см; справа время в мс, последовательно демонстрируя основные элементы процесса.

Последовательно на Рис.1 представлены – кавитационный слой (результат отражения УВ от свободной поверхности), максимальный размер разрыва, минимальный размер схлопнувшегося разрыва (момент взрыва $t = 3.5$ мс, слабый кавитационный эффект), окруженный кавитационным кластером, интенсивный рост кластера на всю толщину нагруженного УВ жидкого слоя и последний снимок – кластер проникает в атмосферу над свободной поверхностью слоя.

Эксперименты проводятся в дистиллированной воде, которая содержит известный спектр микро-неоднородностей. Поэтому, на протяжении всего периода существования квази-пустой полости (ее роста и схлопывания) в окрестности границы полости будут непрерывно расти кавитационные зародыши, формируя своеобразный поверхностный пузырьковый пограничный – кавитационный кластер. Квази-пустой разрыв, окруженный пограничным слоем пузырьков, при захлопывании излучает ультра-короткую ударную волну, которая воздействует на окружающие пузырьки, формируя достаточно заметный кластер, который часто приобретает форму кольцевого вихря, поднимающегося к свободной поверхности слоя.

1. **Gonnermann H. M., Manga M.** Explosive volcanism may not be an inevitable consequence of magma fragmentation // *Nature*. – 2003. – V. 426. P. 432–435

2. **Glass I.I., Heuckroth L. E.** Hydrodynamic shock tube // *Phys. Fluids*. – 1963. – V. 6, N 4. P. 543–549.

3. **Kedrin V.K., Bol'shakova E.S.** Empty cavity in a cavitating liquid: feature of flow structure // *Journal of the Acoustical Society of America*. – 2015.-Vol. 138, No. 3, Pt.2 of 2, September 2015. P.1829

Работа поддержана РФФИ, грант № 15-05-03336.

Борд Е.Е.¹, Черевко А.А.¹, Чупахин А.П.¹¹ Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, НовосибирскE-mail: bord.elizaveta@yandex.ru

Релаксационные колебания в сложной составной системе «пульсирующий поток крови – упругие стенки сосудов – окружающая среда мозга» описываются обобщенным уравнением Ван-дер-Поля – Дуффинга [1].

Изучаются свойства решений данного уравнения для разных пациентов с учетом особенностей их сосудистой системы.

Уравнение связывает гемодинамические параметры – безразмерные давление и скорость. Коэффициенты определяются индивидуально для каждого пациента на основе клинических данных методами теории обратных задач [2]. Уравнение имеет решения различной структуры, которая определяется коэффициентами и правой частью.

Уравнения, построенные по клиническим данным, обладают, как правило, устойчивым периодическим решением. Диаграммы Найквиста (ДН) являются удобным инструментом исследования решений уравнения с гармонической правой частью. ДН связывают параметры внешней силы и параметры возбуждаемых в системе колебаний. Такой подход существенно дополняет экспериментальные данные и позволяет расширить исследуемый диапазон возможных внешних воздействий на гемодинамическую систему мозга.

В общей сложности были проанализированы ДН для 300 уравнений, описывающих системы сосудов головного мозга для пяти пациентов с церебральными аневризмами. Обнаружено конечное число паттернов, представляющих динамику изменения реше-

ния уравнения при изменении правой части, начиная с появления субгармоник в решении и заканчивая разрушением периодического решения. Применительно к живой системе, последнее может означать нарушение ее функционирования.

Проводится аналитическое исследование бифуркаций решений уравнения. Выявлены значения параметров, для которых происходит качественная перестройка решений и возникают высокочастотные осцилляции (субгармоники). Результаты аналитических исследований согласуются с численным исследованием бифуркаций.

Проводится сравнение результатов численных расчетов с результатами аналитических исследований уравнений.

1. Н.В. Бутенин, Ю.И. Неймарк, Н.Л. Фуфаев Введение в теорию нелинейных колебаний // М.: Наука, 1987. 385 с.
2. Чупахин А.П., Черевко А.А., Хе А.К., Кривошапкин А.Л., Орлов К.Ю., Баранов В.И., Телегина Н.Ю., Панарин В.А. Измерения и анализ локальной церебральной гемодинамики у больных с сосудистыми мальформациями головного мозга // Патология кровообращения и кардиохирургия. 2012. Т. 16, № 44, С. 27 - 31.
3. Nyquist H. Regeneration theory // Bell System Technical Journal, 1932. V. 11, No. 1. P. 126–147.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 17-08-01736) и гранта Правительства Российской Федерации (грант № 14.W03.31.0002.).

НЕПРЕРЫВНАЯ СПИНОВАЯ ДЕТОНАЦИЯ СИНТЕЗ-ГАЗА С ВОЗДУХОМ В ПЛОСКОРАДИАЛЬНОЙ ВИХРЕВОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

Быковский Ф.А., Ждан С.А., Ведерников Е.Ф.

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

E-mail: bykovskii@hydro.nsc.ru

В Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН в вихревой плоскорadiaльной камере сгорания (КС) диаметром 500 мм детонационным способом сжигали частички антрацита и бурого угля [1]. Для транспортировки угольных частиц в камеру сгорания использовался синтез-газ в соотношениях $\text{CO}/\text{H}_2 = 1/3, 1/2$ и $1/1$, соответственно, который одновременно служил промотором химической реакции в детонационной волне. Цель настоящей работы – реализация и изучение непрерывного детонационного сжигания в воздухе синтез-газа указанных составов, которые получаются при крекинге углеводородов с добавками воды.

Постановка экспериментов. КС представляла собой полузамкнутый объём, ограниченный стенками: цилиндрической и двумя боковыми стенками – плоской и наклонной под углом $\alpha = 7^\circ$. При этом площадь сечения КС вдоль радиуса оставалась примерно постоянной – $S_c = \pi \cdot d_{c1} \cdot \Delta = 23.5 \text{ см}^2$, где $\Delta = 15 \text{ мм}$ – расстояние между стенками у цилиндрической поверхности камеры. Для выхлопа продуктов реакции в наклонной стенке имелось отверстие диаметром $d_{c2} = 250 \text{ мм}$. Воздух в КС подавали сквозь 50 каналов, образованных в кольцевой щели шириной $\delta = 5 \text{ мм}$ рёбрами толщиной $\delta_p = 1 \text{ мм}$ и наклонённых к радиусу под углом $\beta = 75^\circ$. Площадь проходного сечения щели воздуха на входе в камеру равнялась $S_\delta = 76,04 \text{ см}^2$, а коэффициент расширения КС составлял величину $K_s = S_c/S_\delta = 3.1$. Синтез-газ подавали через 150 отверстий сечением $1 \times 0.5 \text{ мм}^2$, ориентированных по радиусу камеры. Расходы воздуха составляли $G_a = 7.8 \pm 0.76 \text{ кг/с}$, синтез-газа: $G_f = 1.2 \pm 0.8, 0.67 \pm 0.076, 0.45 \pm 0.05 \text{ кг/с}$ для составов $\text{CO}/\text{H}_2 = 1/1, 1/2$ и $1/3$, соответственно. Удельные расходы воздуха и горючего через поперечное сечение КС находились в пределах $g_\Sigma = (G_a + G_f)/S_c = 340 \pm 40 \text{ кг/(с} \cdot \text{м}^2)$. При этом коэффициент избытка горючего был практически постоянным: $\phi = 0.72, 0.57$ и 0.47 ± 0.02 для составов $\text{CO}/\text{H}_2 = 1/1, 1/2$ и $1/3$, соответственно. Истечение продуктов происходило в окружающую атмосферу с давлением $p_a = 10^5 \text{ Па}$. Съёмка производилась высокоскоростной видеокамерой через два окна, расположенные диаметрально противоположно вдоль радиуса КС.

Результаты экспериментов и их анализ. Во всех опытах по сжиганию топливовоздушных смесей (ТВС) синтез-газ – воздух трех составов синтез-газа наблюдали устойчивую непрерывную спиновую детонацию (НСД). Фрагмент масштабированной фоторегистрограммы (линейные размеры волн в тангенциальном направлении вблизи цилиндрической поверхности скорректированы с диаметром КС) НСД в смеси синтез-газ – воздух (состав $\text{CO} + \text{H}_2$), приведён на рис. 1. Здесь $p_{m,a}$ и p_{c1} –

статические давления в коллекторе и у цилиндрической поверхности камеры, D и n – скорость и число волн.

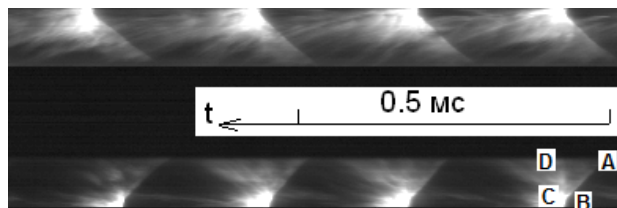


Рис. 1. НСД в ТВС ($\text{CO} + \text{H}_2$) – воздух (фрагмент фоторегистрограммы), $g_\Sigma = 294 \text{ кг/(с} \cdot \text{м}^2)$, $\phi = 0.72$, $p_{m,a} = 13.3 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $p_{c1} = 3.3 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $D = 1.67 \text{ км/с}$, $n = 4$.

Смесь сгорает в детонационном фронте ВС, представляющем собой нерегулярное отражение предвестника АВ от цилиндрической стенки («ножку Маха»). От тройной точки С отходит шлейф CD – ударная волна в продуктах. Похожую структуру наблюдали при НСД в гомогенных и двухфазных смесях в камерах подобной геометрии [2]. Аналогичная структура волн регистрировалась и для синтез-газа составов $\text{CO} + 2\text{H}_2$ и $\text{CO} + 3\text{H}_2$. Отношение ширины фронта ВС (h) к расстоянию между волнами (l) составляло величину – $h/l \approx 15$.

При близких удельных расходах установлена сильная зависимость НСД от коэффициента избытка горючего. Так, в более химически активных составах синтез-газа на пониженных значениях ϕ наблюдалось меньшее количество волн ($n = 3 \pm 1$), чем для менее активной смеси ($\text{CO} + \text{H}_2$) + воздух ($n = 4$ или 3). Этот вопрос будет исследован в будущем. Как и ранее [2], для всех исследованных ТВС наблюдались повышенные давления у цилиндрической поверхности радиальной камеры при холостых запусках по сравнению с НСД при тех же удельных расходах g_Σ (примерно вдвое). Причина – увеличенные значения центробежных сил при истечении холодного газа по сравнению с истечением более лёгких горячих продуктов НСД.

Таким образом в вихревой плоскорadiaльной КС диаметром 500 мм впервые реализованы многоволновые режимы НСД смеси воздуха с синтез-газом в соотношениях $\text{CO}/\text{H}_2 = 1/3, 1/2$ и $1/1$, соответственно. Структура детонационных волн и высоты фронтов исследованных ТВС близки к определенным ранее для смесей каменный уголь – воздух.

1. Быковский Ф.А., Ждан С.А., Ведерников Е.Ф., Жолобов Ю.А. Детонационное сжигание частиц антрацита и бурого угля в проточной радиальной камере // Физика горения и взрыва. – 2016. – Т.52, № 6. – С. 94-103.

2. Быковский Ф.А., Ждан С.А. Непрерывная спиновая детонация. Новосибирск. Изд-во СО РАН. 2013. 423 с.

Работа поддержана РФФИ (гранты №14-08-00080а, №17-08-00448а).

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ В ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Д.А. Виноградов, И.О. Тепляков, Ю.П. Ивочкин, И.Б. Клементьева

Объединённый институт высоких температур РАН, Москва, Россия

E-mail: igor.teplyakov@mail.ru

Аннотация. Численно исследована структура течений в полусферическом контейнере при влиянии внешнего осевого магнитного поля, которое приводит к образованию восходящего вихря. Расчеты проведены для разных соотношении размеров малого и большого электродов. Получена зависимость, разделяющая структуру ЭВТ на две зоны, с одним и двумя вихрями.

Введение. При пропускании электрического тока через объем жидкого металла возникает объёмная вихревая сила $\mathbf{F}=\mathbf{J}\times\mathbf{B}$ (здесь, $\mathbf{J}$ и $\mathbf{B}$ – плотность электрического тока и магнитная индукция созданного им поля), приводящая в случае пространственно неоднородного распределения $\mathbf{J}$ к образованию т.н. электровихревого течения (ЭВТ) [1]. В полусферической системе с центральным электродом, без внешних магнитных полей, ЭВТ имеет форму тороидального вихря, см. рис. 1а. Внешнее осевое магнитное поле приводит к азимутальной закрутке течения (рис. 1б), при этом возникает вихрь направленный противоположно основному течению (рис. 1в,1г) [2-4].

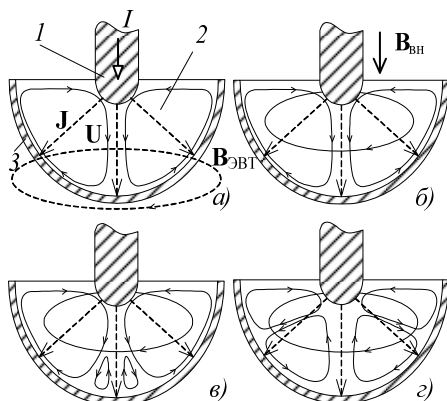


Рис. 1. Структура ЭВТ под действием внешнего осевого магнитного поля. 1 - малый электрод, 2 - жидкий металл, 3 - контейнер-электрод. а) ЭВТ имеет вид тора, б) появление азимутальной закрутки, в) возникновение вторичного вихря, г) двухвихревое вращающееся ЭВТ

Численная методика. Цель данной работы - получение границы раздела один вихрь - два вихря в зависимости от параметров ЭВТ (силы тока I и внешнего магнитного поля $B_{\text{вн}}$), а также свойств металлической жидкости. Расчеты выполнялись в безразмерном виде (переход от зависимости B - I к зависимости α - S) [5].

При этом:

$$S = \text{Re}^2 = \mu_0 I^2 / \rho \nu^2,$$

$$N = B I_0 R_2 / \rho \nu^2,$$

$$\alpha = B_{\text{вн}} / B_0 = N / S.$$

Численные расчеты проводились методом контрольного объема на неструктурированной сетке, решалось уравнение движения при использовании нестационарной ламинарной модели. Были рассчитаны режимы, для соотношений размеров малого и большого электродов: 1:10, 1:37.6 и 1:100.

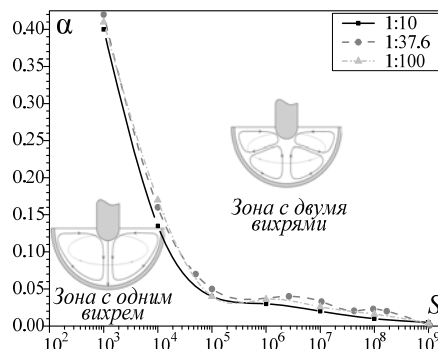


Рис. 2. Границы раздела зон с двумя вихрями и одним вихрем граница в параметрах α - S .

Результаты. На рис. 2 представлены, полученные границы раздела зоны с одним и двумя вихрями. С ростом параметра S , требуется меньшее α для образования восходящего вихря. В размерном виде с ростом электрического тока, пропускаемого через электропроводящую жидкость, требуются большее внешнее магнитное для образования восходящего вихря, а с увеличением размера малого электрода меньшее магнитное поле.

1. Боярев В.В., Фрейберг Я. Ж., Шилова Е. И., Щербинин Э. В. Электровихревые течения. Рига: Зинатне, 1985. 315 с.
2. В.Г.Жилин, Ю.П.Ивочкин, И.О.Тепляков. К вопросу о закрутке осесимметричных электровихревых течений. // Теплофизика высоких температур №6, 2011, с. 957-959.
3. Жилин В.Г., Ивочкин Ю. П., Игумнов В. С., Оксман А. А. Экспериментальное исследование электровихревых течений в полусферическом объеме // ТВТ. 1995. Т. 33. № 1. С. 490-491.
4. Ивочкин Ю.П., Тепляков И.О., Гусева А.А. Численное и экспериментальное исследование структуры закрученного электровихревого течения // ТПТ. 2012. № 8. С. 5-11.
5. V. Shatrov, G. Gerbeth. Stability of the electrically induced flow between two hemispherical electrodes, Vol. 48, No. 3, 469-484, 2012.

Власенко М. Г., Чернов А. А., Барташевич М. В., Дехтярь Р. А.

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

E-mail: vlasenko.mg@itp.nsc.ru

В данной работе исследуется тепломассоперенос в процессе неизотермической абсорбции из парового пузырька постоянного размера, находящегося в водном растворе бромида лития. В работе [1] представлена модель абсорбции из парового пузырька в предположении постоянного радиуса, а тепломассоперенос развивается в тонком слое жидкости; представлены автомодельные решения. В [2] представлена задача об изотермическом растворении движущегося пузырька газа. Экспериментальные исследования пузырьковой абсорбции на примере системы раствор бромида лития – пар приведены в работе [3]. В [4] проведено экспериментальное сравнение двух режимов абсорбции – пленочного и пузырькового. Показано, что скорость абсорбции в пузырьковом режиме всегда больше, чем в пленочном режиме. В работе [5] моделировалось движение одиночного пузырька и слияние пузырьков в вертикальной восходящей трубе методом решёточных уравнений Больцмана.

В представленной модели предполагается, что давление и температура внутри пузыря не изменяются. Поскольку диаметр пузыря постоянный, то есть радиальным движением пара пренебрегаем, то пар внутри пузыря считаем покоящимся и конвективной составляющей в уравнениях тепломассопереноса пренебрегаем. В безразмерной форме система уравнений, описывающая процесс тепломассопереноса в пузыре, имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r}, \quad \frac{\partial \bar{C}}{\partial \tau} = Le \left(\frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \bar{C}}{\partial r} \right), \quad (1)$$

где θ – безразмерная температура, $\bar{C}$ – безразмерная концентрация абсорбируемого вещества в растворе, $\bar{r}$ – безразмерный радиус пузыря, τ – безразмерное время, Le – число Льюиса. Условия на поверхности пузыря при $\bar{r}=1$ имеют вид $\theta = \theta_s$, $\bar{C} = \bar{C}_s$ и $\theta_s + \bar{C}_s = 1$, аналогично модели [1], здесь $\theta_s = (T_s - T_i)/(T_f - T_i)$, $\bar{C}_s = (C_s - C_i)/(C_f - C_i)$, $C_i = k_1 - k_2 T_f$, $C_f = k_1 - k_2 T_i$ и $C_s = k_1 - k_2 T_s$ – начальная, конечная и равновесная концентрации раствора, соответственно. Условие для потока массы на границе пузырька имеет вид

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial \chi} \right|_{\chi=1/\sqrt{\tau}} = \frac{K Le (C_f - C_i)}{(1 - C_i)} \left. \frac{\partial \bar{C}}{\partial \chi} \right|_{\chi=1/\sqrt{\tau}},$$

где $K = r_a / C_p \Delta T$ – число Кутателадзе, r_a – скрытая теплота фазового перехода, $\Delta T = T_f - T_i$, C_p – удельная теплоемкость раствора. Условия на бесконечности при $\bar{r} \rightarrow \infty$: $\theta = 0$, $\bar{C} = 0$.

Автомодельное решение представленной задачи имеет вид:

$$\theta = \frac{\theta_s \left(\sqrt{\pi} - \frac{1}{\chi} e^{-\frac{\chi^2}{4}} - \frac{\sqrt{\pi}}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\chi}{2} \right) \right) \right)}{\sqrt{\pi} - \sqrt{\tau} e^{-\frac{1}{4\tau}} - \frac{\sqrt{\pi}}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{1}{2\sqrt{\tau}} \right) \right)},$$

$$\bar{C} = \frac{\bar{C}_s \left(\sqrt{\frac{\pi}{Le}} - \frac{1}{\chi} e^{-\frac{\chi^2}{4Le}} - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{Le}} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\chi}{2\sqrt{Le}} \right) \right) \right)}{\sqrt{\frac{\pi}{Le}} - \sqrt{\tau} e^{-\frac{1}{4Le\tau}} - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{Le}} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{1}{2\sqrt{Le\tau}} \right) \right)},$$

где $\chi = \bar{r}/\sqrt{\tau}$.

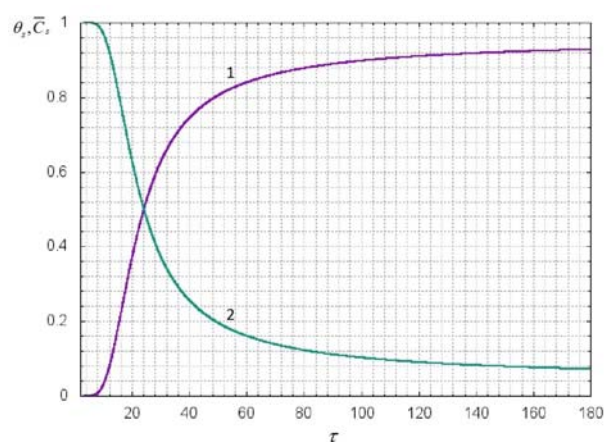


Рис. 1. Безразмерная концентрация (1) и безразмерная температура (2) на межфазной поверхности в зависимости от числа Фурье.

Получены автомодельные решения для температуры и концентрации, рассмотрены основные критерии процессов. Показано, что в процессе абсорбции концентрация воды в пограничном слое увеличивается и вызывает изменение температуры (Рис.1). В работе представлены рассчитанные распределения безразмерной температуры и концентрации как функции расстояния от поверхности пузыря для различных температурных режимов и чисел Фурье. На межфазной поверхности равновесная концентрация со временем растёт.

Список литературы

1. Накоряков В.Е., Григорьева Н.И. Неизотермическая абсорбция в термотрансформаторах. Новосибирск: Наука, 2010.
2. Левич В. Г., Физико-химическая гидродинамика, М.: Физматгиз. 1959.
3. Saravanan R., Maiya M.P. Experimental analysis of a bubble pump operated H₂O–LiBr vapour absorption cooler // Applied Thermal Engineering. 2003. V. 23. P. 2383–2397.
4. Kang Y., Akisawa A., Kashiwagi T. Analytical investigation of two different absorption modes: falling film and bubble types // International Journal of Refrigeration. 2000. V. 23. P. 430–443.
5. Gao H., Liu B., Yan Y. Numerical simulation of bubbles motion in lifting pipe of bubble pump for lithium bromide absorption chillers // Applied Thermal Engineering. 2017. V. 115. P. 1398–1406.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-10025).

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ВОЛНОВЫХ РЕЖИМОВ НА СТЕКАЮЩЕЙ ПЛЕНКЕ ЖИДКОСТИ

Вожаков И.С.^{1,2}, Архипов Д.Г.^{1,2}, Цвелодуб О.Ю.^{1,2}

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

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск

E-mail: vzhakov@gmail.com

Настоящая работа посвящена моделированию динамики нелинейных волн на пленке жидкости, стекающей под действием силы тяжести. Полная постановка задачи для жидкости включает уравнения Навье–Стокса и неразрывности с соответствующими кинематическими и динамическими граничными условиями. Существует непрерывно дифференцируемое преобразование координат, отображающее область течения жидкости в полосу постоянной толщины:

$$x = x, \quad \eta = y/h(x, t) - 1, \quad t = t. \quad (1)$$

Новые переменные (1) не ортогональны, поэтому обычная формулировка уравнений движения в векторной форме неприменима. Выполнить преобразование (1) можно с использованием новых переменных в уравнениях, записанных в тензорной, инвариантной относительно систем координат, форме. Используя такую запись для случая пленки, свободно стекающей по вертикальной плоскости в поле тяжести в приближении длинноволновости возмущений, в работе [1] была получена система:

$$\frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(u^2h)}{\partial x} + \frac{\partial(uvh)}{\partial \eta} = -\frac{h}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho h} \frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2} + gh, \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial \eta} = 0, \quad (3)$$

При этом для свободно стекающей пленки на твердой стенке выполняются граничные условия прилипания:

$$u(x, -1, t) = v(x, -1, t) = 0, \quad (4)$$

а на свободной поверхности – условие отсутствия касательных напряжений и кинематическое условие, соответственно:

$$\frac{\partial u}{\partial \eta}(x, 0, t) = 0, \quad v(x, 0, t) = 0 \quad (5)$$

здесь h — толщина пленки, p — давление, u и v — контравариантные компоненты продольной и поперечной скорости соответственно, ρ — плотность, μ — динамическая вязкость жидкости.

В настоящей работе выполнено моделирование эволюции свободно-стекающей пленки жидкости при умеренных числах Рейнольдса по уравнениям (2)–(5) на базе из четных полиномов по поперечной координате с помощью псевдо-спектрального метода. Показано, что в диапазоне безразмерных волновых чисел $\alpha \in [0.41, 0.5]$ отсутствует стационарно-бегущий режим и наблюдается предельный цикл, характеризующийся попеременным доминированием первой и второй гармоник. При определенных параметрах

предельный цикл может иметь очень длительный период, что приводит к квазистационарно-бегущему режиму с дальнейшим полным перестроением и последующим восстановлением квазистационара.

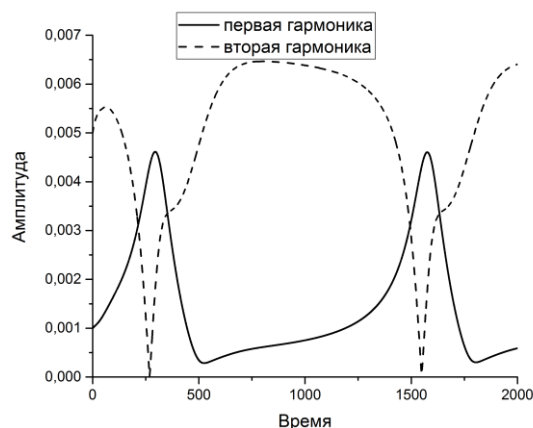


Рис. 1. Эволюция амплитуды первых двух гармоник.

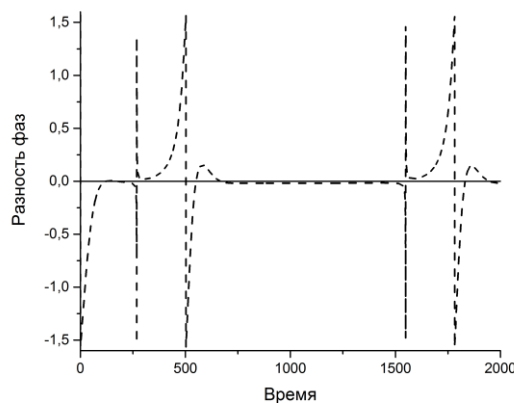


Рис. 2. Эволюция разности фаз первой и второй гармоник

Проведен линейный анализ устойчивости нелинейных стационарно-бегущих решений системы, полученных в результате бифуркационного анализа семейств, получающихся при ветвлении от нейтральной точки.

1. Алексеев С. В., Архипов Д. Г., Цвелодуб О. Ю. Дивергентная система уравнений для пленки жидкости, стекающей по вертикальной плоскости // Доклады Академии наук. — 2011. — Т. 436, № 1. — С. 43-46.

Работа поддержана РНФ (грант №14-22-00174).

ФОРМИРОВАНИЕ ПОТОКОВ КАПЕЛЬ В МЕЖЛОПАТОЧНОМ КАНАЛЕ СОПЛОВОЙ ТУРБИННОЙ РЕШЕТКИ

Грибин В.Г.¹, Тищенко А.А.¹, Тищенко В.А.¹, Гаврилов И.Ю.¹, Хомяков С.В.¹, Попов В.В.¹, Алексеев Р.А.¹

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

E-mail: GavrilovIY@mpei.ru

В настоящее время остается актуальной проблема эрозийного износа поверхностей рабочих лопаток работающих в области влажного пара, как при создании турбин нового поколения, так и при модификации старых. Для борьбы с данным процессом необходимо исследование характеристик жидкой фазы в турбинной решетке. Эффективные методы борьбы с эрозией должны опираться на фундаментальные знания о характере распределения крупнодисперсной влаги в проточной части паровой турбины. Сегодня картина движения эрозийно опасных частиц до конца не ясна.

До недавнего времени, образование потоков капель в межлопаточном канале имело качественный характер определения, основанный на косвенных измерениях за фронтом решетки и численном моделировании [1].

Применение современных экспериментальных подходов на базе систем лазерной диагностики потоков «Полис» позволяет более детально изучить особенности движения эрозийноопасных капель [2, 3]. При этом перспективным в решении поставленного вопроса является метод PTV (particle tracking velocimetry) [4], который позволяет определить скорости капель, попавших в область оптических исследований. Описание методики применения и первые полученные результаты основных кинематических параметров капель в межлопаточном канале представлены в [5].

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования формирования и движения крупных капель в межлопаточном канале сопловой турбинной решетки.

В качестве объекта исследования использовался плоский пакет периферийного сечения сопловой лопатки последней ступени турбины, расположенного как раз в той области, где сосредоточена наибольшая концентрация крупнодисперсной влаги. Эксперимент проводился на стенде контура влажного пара (КВП), тепловая схема которого включена в тепловую схему ТЭЦ МЭИ.

Экспериментальные исследования проводились в условиях полидисперсного двухфазного потока.

В работе рассматривается влияние теоретического числа Маха M_{1t} за решеткой и отношение плотностей фаз перед исследуемым объектом. Второй параметр изменялся за счет изменения плотности пара путем изменения давления полного торможения перед ре-

шеткой. При этом число Re по паровой фазе оставалось в зоне автомодельности.

На основе полученных результатов определены характерные потоки капель и источники их возникновения. В межлопаточном канале можно выделить два основных источника влаги: первичная и вторичная. Первичные – это капли образованные перед исследуемым объектом, с помощью центробежных форсунок. Вторичные – это капли образованные в результате взаимодействия первичной влаги с поверхностью профиля, которые представляют наибольший интерес с точки зрения формирования эрозийно опасной влаги за исследуемым объектом.

В результате в работе были определены области лопатки, на которых формируются вторичные капли. Произведен анализ их формирования и движения в межлопаточном канале. Использование численного моделирования совместно с экспериментальными данными позволило определить диаметры вторичных капель.

Показано, какие капли из вторичной влаги могут повторно взаимодействовать с поверхностью лопатки.

Кроме этого эти капли сформируют парокпельный слой вблизи поверхности лопатки со стороны давления. Определены толщина данного слоя и кинематические характеристики жидкой фазы в нём.

Список литературы:

1. Дейч М. Е. Газодинамика решеток турбомашин. М.: Энергоатомиздат. 1996. 528 с.
2. Грибин В.Г., Тищенко А.А., Гаврилов И.Ю., Тищенко В.А., Сорокин И.Ю., Попов В.В., Хомяков С.В. Влияние режимных параметров паротурбинной установки на характер распределения потоков частиц жидкой фазы за изолированной сопловой решёткой во влажно-паровом потоке // Промышленная энергетика. 2015. № 11. С. 30 – 360
3. Гаврилов И.Ю., Попов В.В., Сорокин И.Ю., Тищенко В.А., Хомяков С.В. Методика бесконтактного определения средних размеров эрозийноопасных капель в полидисперсном влажно-паровом // Теплоэнергетика. 2014. № 8. С. 39 – 46.
4. Filippov G., Gribin V., Tishchenko A., Tishchenko V., Gavrilov I. Experimental studies of polydispersed wet steam flows in a turbine blade cascade // Proceedings of the IMechE, Part A: Journal of Power and Energy. 2014. V. 228. No. 2. P. 168 – 177.
5. Sorokin I., Gribin V., Gavrilov I., Tishchenko A., Tishchenko V., Popov V., Khomyakov S., Alexeev R. Features of liquid phase movement in the interblade channel of nozzle blade cascade // Proc. Wet Steam Conference Prague. Prague. 2016. P. 201 – 211.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 14-19-00054).

Гешева Е.С.¹, Шторк С.И.^{1,2}¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск² Новосибирский государственный университет (НГУ), Новосибирск

E-mail: anohina_liza@mail.ru

Использование закрученного потока в технических приложениях позволяет значительно повысить эффективность работы устройств, ускорить процессы, протекающие в камере сгорания и уменьшить габариты установки. В качестве первоначального этапа физического моделирования топочных камер, как правило, используют приближенное изотермическое моделирование на подобных уменьшенных моделях [1, 2]. Детальные экспериментальные данные, полученные на моделях, могут быть использованы для верификации математических моделей, используемых для расчета топочных камер.

В данной работе на основе проведенного исследования характеристик крупномасштабных вихрей были исследованы линии тока, рассчитанные с помощью коммерческого пакета. Данные моделирования верифицировались экспериментальными данными, полученными с помощью PIV эксперимента, датчиков давления и визуализации вихрей на гидравлическом стенде с камерой квадратного сечения и тангенциальной закруткой потока [3].

Моделирование закрученного потока проводилось с использованием трех основных методов моделирования RANS, DES, LES. При сравнении полей и профилей скорости в различных сечениях было показано, что метод LES наиболее точно описывает картину закрученного потока в рабочей камере (см. рис. 1).

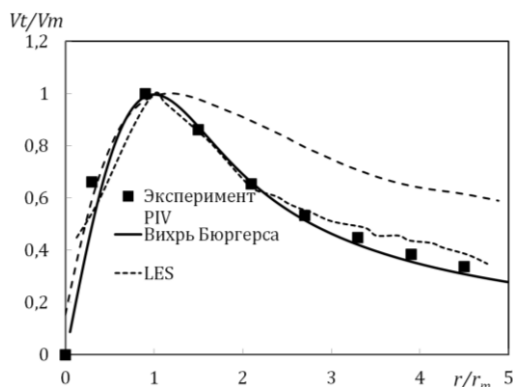


Рис. 1. Тангенциальный профиль скорости. Сравнение экспериментальных данных с результатами моделирования и моделью Бюргерса.

При варьировании граничных условий в камере образуются различные вихревые структуры. Так в камере с плоским дном и диафрагмированным отверстием образуется прямолинейный вихрь. При смещении диафрагмы вихрь принимает спиралевидную форму. В случае с центральной диафрагмой и двускатным дном образуется двуспиральная вихревая структура.

Для оценки эффективности использования закрутки потока рассчитывалось времянахождение

частиц в камере, запущенных из центров сопел для каждого из вариантов геометрии (см. рис. 2).



Рис. 2. Линии тока из одного соплового блока для односпирального вихря.

В случае с прямолинейным вихрем среднее время прибытия частиц в камере составило $t = 2,8$ с, тогда как в камере со смещенной диафрагмой $t = 5,5$ с. Средняя длина пути также увеличилась с $L = 2,63$ м до $L = 4,25$ м. Таким образом, смещение диафрагмированного отверстия дает значительное увеличение времянахождения частиц в камере и $t_{sp}/t_b = 5,485/2,809 = 1,953$ и пройденного пути $L_{sp}/L_b = 4,251/2,631 = 1,513$. Данные характеристики являются определяющими для камер сгорания и позволяют контролировать реагирующие потоки, увеличить эффективность сгорания топлива.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-29-00093).

Список литературы

1. Anufriev I.S., Sharypov O.V., Shadrin E.Yu. Flow diagnostics in a vortex furnace by particle image velocimetry // Technical Physics Letters, 2013, Vol. 39, No. 5, P. 466–468.
2. Алексеенко С.В. Аэродинамические эффекты в энергетике // Новосибирск. (Препринт/216 ИТ СО АН СССР). 1990. - 58 с.
3. Гешева Е. С., Шторк С. И., Алексеенко С. В. Исследование характеристик концентрированного вихря в тангенциальной камере с помощью PIV техники и компьютерного моделирования // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2014. Т. 9, вып. 3. С. 39–48.

Артериовенозная мальформация (далее АВМ) является сложным и опасным пороком развития сосудов головного мозга. Данная патология является врожденным пороком развития сосудов. Зачастую обострения у пациентов происходят в возрасте 30-40 лет. Эндоваскулярная эмболизация АВМ является эффективным средством лечения таких патологий. Но не смотря на хорошо развитую технику операций по эмболизации, до сих пор сохраняется опасность непредсказуемого разрыва АВМ во время операции и в течении нескольких суток после её окончания. Цель данной работы состоит в том, чтобы смоделировать процесс эмболизации и построить оптимизационный алгоритм эмболизации АВМ.

Артериовенозная мальформация может адекватно моделироваться пористой средой в силу того, что она состоит из хаотического неупорядоченного переплетения выродившихся сосудов различных малых диаметров (от 0.01 до 1 см), осуществляющих шунтирование крови из артерии в вену. Процесс эмболизации описывается в этой модели внедрением в пористую среду, заполненную жидкостью (кровью), другой жидкости (эмболизата), несмешивающейся с первой.

Процесс эмболизации в одномерном приближении описывается уравнением Баклея-Левретта, которое решается численно с помощью новой модификации схемы Кабаре. Для проверки пригодности метода при расчёте задач эмболизации, были проведены численные эксперименты, в которых смоделированы основные моменты процесса эмболизации и проведено сравнение расчетов с точными решениями [1].

Предложенная модель оптимальной эмболизации имеет две новые принципиальные особенности.

1. На процесс эмболизации накладывается требование об ограничении удельной нагрузки на узел

АВМ при эмболизации [2]. Это требование следует из нейрохирургической практики и обосновано на гидравлической модели эмболизации АВМ. Оно формулируется в виде ограничения:

$$\Delta E/V \leq W_{max},$$

где ΔE - энергия, рассеиваемая в АВМ за единицу времени. Она равна разности потоков энергии на входе в АВМ и выходе из неё. V - объём АВМ, W_{max} - предельное допустимое значение удельной нагрузки.

2. Процесс эмболизации описывается как процесс оптимального управления, в котором, управляя концентрацией эмболизата на входе в АВМ, нужно добиться максимально возможной её эмболизации за конечное время при выполнении ограничения.

Показано, что оптимальное управление состоит из интервалов, на которых либо насыщенность крови на входе в АВМ достигает минимального допустимого значения, что означает максимальную подачу эмболизата, либо в процессе эмболизации постоянно поддерживается предельно допустимая нагрузка W_{max} .

1. Cherevko A.A., Gologush T.S., Ostapenko V.V., Petrenko I.A., Chupakhin A.P. Modeling process of embolization arteriovenous malformation on the basis of two-phase filtration model // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. Volume 722. Paper 012009.
2. Кривошапкин А.Л., Панарин В.А., Орлов К.Ю., Берестов В.В., Шаяхметов Т.С., Горбатов А.В., Кислицин Д.С., Чупахин А.П., Черевко А.А., Хе А.К., Сергеев Г.С., Чебыкин Д.В. Алгоритм предупреждения гемодинамических кровоизлияний при эмболизации церебральных артериовенозных мальформаций// БЮЛЛЕТЕНЬ СО РАМН. 2013. Т. 33. С. 65-7

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 17-08-01736) и гранта Правительства Российской Федерации (грант № 14.W03.31.0002.).

КЛАССИФИКАЦИЯ ДВУХСЛОЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ТРЕХМЕРНОМ КАНАЛЕ С ИСПАРЕНИЕМ НА ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА

Бекежанова В.Б.¹, Гончарова О.Н.^{2,3}

¹ Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

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

³ Алтайский государственный университет, Барнаул

E-mail: gon@math.asu.ru

Активное изучение процессов конвекции, сопровождающихся испарением или конденсацией на границе раздела, является важнейшей мотивацией для развития теории испарительной конвекции, аналитического и численного исследования новых нестандартных задач в областях с границами раздела. В Институте теплофизики СО РАН проводится новая серия экспериментов по изучению особенностей поведения жидкости в горизонтальном слое под действием потока газа и вызываемого им испарения. Особое внимание уделяется изучению процесса испарения, измерению массовой скорости испарения и температуры на поверхности жидкости, исследованию структуры течения вблизи поверхности раздела.

В данной работе представлены результаты теоретического исследования конвективных течений с испарением на термокапиллярной границе раздела, проведенное на основе нового точного решения стационарной трехмерной задачи конвекции двух не смешивающихся жидкостей, заполняющих бесконечный канал с прямоугольным поперечным сечением. Данное решение (трехмерное обобщение решения Остроумова-Бириха [1, 2, 3]) описывает совместное течение испаряющейся жидкости и парогазовой смеси и характеризуется тем, что компоненты вектора скорости являются функциями, зависящими от двух поперечных координат. При этом давление, температура и концентрация пара также имеют аналогичные составляющие и линейно зависят от продольной координаты. Течение сред в канале, находящемся в поле силы тяжести, вызвано действием вдоль границы раздела продольного градиента температуры. Постановка задачи включает в себя уравнения конвекции Обербека-Буссинеска и соотношения на границе раздела: кинематическое и динамическое условия на свободной поверхности, условие баланса тепловых потоков с учетом диффузионного потока массы пара, уравнение баланса массы, условие непрерывности температуры и касательных скоростей, а также соотношение для концентрации насыщенного пара. При математическом моделировании учтены эффекты диффузионной теплопроводности и термодиффузии. На твердых стенках канала, которые предполагаются теплоизолированными, выполняются условия прилипания для скорости и одно из двух условий для функции концентрации пара: условие нулевой концентрации пара ($C=0$) либо условие отсутствия потока пара.

Проведена классификация режимов течений в рамках указанной постановки задачи по структуре линий тока и траекторий, а также по распределению температуры в канале. Построены альбомы трёхмерных течений в системе «жидкость-газ» типа «этанол-азот» и «HFE7100-азот» в канале при условии, что толщина h_f слоя жидкости равна либо меньше толщины h_g парогазового слоя ($h_f = h_g$, $h_f = h_g/2$ и $h_f = h_g/5$). Пример линий тока и траекторий в системе «HFE7100-азот» представлены на рис. 1 (здесь A – безразмерный продольный градиент температуры, Gr – число Грасгофа; на твердых границах выполнено условие $C=0$). Численные исследования двухслойных течений с испарением для систем рабочих жидкостей проведены в условиях нормальной и пониженной гравитации. Изучено влияние испарения на характеристики течений.

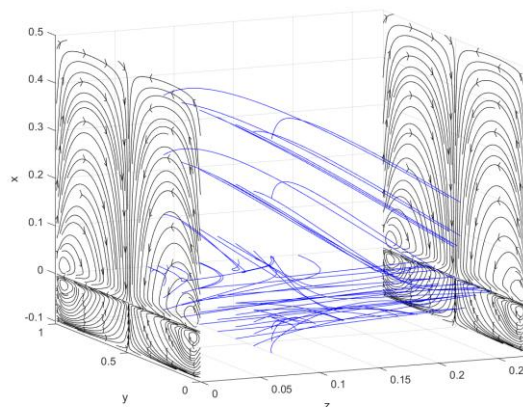


Рис. 1. Линии тока и траектории в системе «HFE7100-азот»; $h_g = 0.5$, $h_f = 0.1$; $A = 0.1$; $Gr = 12200$.

1. Goncharova O.N., Kabov O.A., Pukhnachov V.V. Solutions of special type describing the three dimensional thermocapillary flows with an interface // Int. J. Heat Mass Transfer. 2012. V. 55. No. 4. P. 715–725.
2. Goncharova O.N., Kabov O.A. Investigation of the two-layer fluid flows with evaporation at interface on the basis of the exact solutions of the 3D problems of convection // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 754. No. 032008. P. 1–6.
3. Bekezhanova V.B., Goncharova O.N. Stability of exact solutions describing two-layer flows with evaporation at the interface // Fluid Dynamics Research. 2016. V. 48. No. 6. P. 061408.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 15-19-20049).

**АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ АВАРИЙНЫХ РЕЗИСТОРОВ
ТЕРМОЯДЕРНОЙ УСТАНОВКИ ИТЭР**

**Григорьев С.А.¹, Танчук В.Н.¹, Локиев В.А.¹, Рошаль А.Г.¹,
Михалюк Д.С.², Капранов И.Е.²**

¹ ОАО «НИИЭФА», 196641, Санкт-Петербург

² ЗАО «КАДФЕМ Си-Ай-Эс», 195197, Санкт-Петербург,

E-mail: sergey.grigoriev@sintez.niiefa.spb.su

Сверхпроводящая магнитная система (МС) термоядерного реактора ИТЭР в процессе работы аккумулирует до 50 МДж энергии. В случае нештатных ситуаций, вызывающих переход МС из сверхпроводящего состояния в «тёплую» фазу, эту накопленную энергию необходимо быстро вывести. Разрабатываемые в НИИЭФА резисторы быстрого разряда (FDR) предназначены для того, чтобы совместно с коммутирующей аппаратурой, вывести и утилизировать энергию МС при опасности возникновения ее «отепления», предохраняя тем самым магниты от разрушения.

Система FDR представляет собой набор секций, состоящих из резистивного элемента, заключённого в стальной короб. От двух до четырёх секций, поставленных вертикально друг на друга, образуют отдельный модуль.

При выводе энергии резистивные элементы нагреваются практически адиабатно, затем их необходимо охладить до первоначальной температуры в течение 4-6 часов. С этой целью авторами была разработана система воздушного охлаждения. В основу принятия технических решений были положены результаты натурных экспериментов и численного моделирования с использованием кодов Fluent и CFX. В работе отражена существенная эволюция конструкции системы охлаждения на этапе разработки от естественной циркуляции до применения вынужденной вентиляции.

Отказ от использования естественной циркуляции обусловлен тем, что как показали численные эксперименты, распределение воздушного потока в параллельных каналах охлаждения, сформированных вертикальными модулями, существенно неравномерно, что приводит к значительному увеличению времени остывания. Так, если для одиночного модуля FDR расчетное время охлаждения не превышает 2-3 часов (что было подтверждено проведением полноразмерных экспериментов), то время охлаждения нескольких модулей уже превышало 20 часов. Переход на систему вынужденной циркуляции позволило смягчить негативное влияние неравномерности потока воздуха в системе модулей FDR и, в конечном счёте, снизить время охлаждения в 4-5 раз до требуемых 4-6 часов. Для уменьшения неравномерности раздачи воздушного потока по параллельным модулям на основе 3D моделирования была разработана система аэродинамических решеток, позволяющая снизить влияние раздающего коллектора.

Ключевые слова: сверхпроводящая магнитная система ИТЭР; резисторы для быстрого вывода энергии; система охлаждения; естественная циркуляция воздуха; вынужденная циркуляция воздуха; 3D моделирование.

Губайдуллин А.А., Болдырева О.Ю., Дудко Д.Н.

Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Тюменский государственный университет, Тюмень

E-mail: gubai@tmn.ru

Численно исследованы волновые процессы в пористой среде, насыщенной пузырьковой жидкостью, с учетом нелинейности колебаний пузырьков. Нелинейность учтена в уравнении состояния газа и уравнении Рэлея - Ламба. Численное исследование в рамках нелинейной модели выполнено впервые.

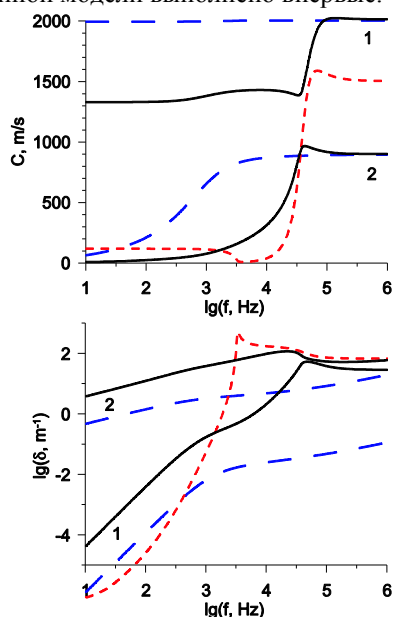


Рис. 1. Фазовые скорости и линейный декремент затухания деформационной (1) и фильтрационной (2) волн в насыщенной пузырьковой жидкостью пористой среде (сплошные линии), в пузырьковой жидкости (пунктирные линии), и в насыщенной жидкостью пористой среде (штриховые линии).

Получены дисперсионные зависимости для линейных волн в содержащей пузырьковую жидкость пористой среде, а также для основной моды колебаний в цилиндрической полости в такой среде. Рассчитаны частотные зависимости скорости и затухания гармонических волн в цилиндрическом волноводе. Проанализировано влияние свойств пористой среды и параметров пузырьковой жидкости на скорость и затухание волн, а также на глубину проникновения возмущений в окружающую пористую среду.

На рис.1 показаны фазовые скорости и линейный декремент затухания деформационной (1) и фильтрационной (2) волн в насыщенной пузырьковой жидкостью пористой среде (черные линии). Для сравнения также приведены скорость и затухание для волн в пузырьковой жидкости (красные линии), и в насыщенной жидкостью пористой среде (синие линии). Используемые в представленном расчете равновесные параметры среды следующие: пузырьковая жидкость – вода + воздух, равновесное давление смеси 1 бар, объемная доля газа в пузырьковой жидкости 0.01, радиус пузырьков 1 мм, скелет пористой среды – кварц, пористость 0.4, характерный радиус пор 0.1 мм. Минимум скорости распространения волн в пузырьковой жидкости (пунктирная линия) соответствует частоте собственных колебаний пузырьков и составляет 3.25 кГц. При этих и более низких частотах скорость быстрой и медленной волн в насыщенной пузырьковой жидкостью пористой среде ниже, а затухание выше, чем в пористой среде, насыщенной жидкостью без пузырьков газа. С ростом частоты скорости волн достигают тех же значений, что и в пористой среде с жидкостью без пузырьков газа.

Исследовано прохождение волны ступенчатого профиля из жидкости в пористую среду, насыщенную пузырьковой жидкостью. Расчет прохождения импульса в насыщенную пузырьковой жидкостью пористую среду проводился в рамках нелинейной модели. Нелинейность учитывалась в уравнении состояния газа и уравнении Рэлея – Ламба для газового пузырька в пористой среде. Изучено влияние параметров среды и интенсивности падающей волны на эволюцию волн в насыщенной пузырьковой жидкостью пористой среде.

Результаты расчетов показывают хорошее качественное согласование с экспериментальными данными других авторов.

Работа поддержана РФФИ (грант № 17-51-540001) и Советом по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ РФ (грант НШ-6987.2016.1)

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОТДАЧИ НАЧАЛЬНОГО УЧАСТКА КАНАЛА НА ПУЛЬСИРУЮЩИХ РЕЖИМАХ ТЕЧЕНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Давлетшин И.А., Паерелий А.А.

Казанский научный центр РАН, Казань

E-mail: davlet60@mail.ru

Вынужденные пульсации потока способны существенным образом изменить структуру течения и его гидродинамические и тепловые характеристики [1-3]. В условиях волновой структуры пульсирующего течения наряду с геометрией интересующих объектов (стенка, диффузор, диафрагма и т.д.) на параметры потока будет влиять и место их расположения в канале. В частности можно ожидать, что реакция параметров потока на вынужденные пульсации будет иметь свои особенности на начальном участке канала и в автомоделной области. Таким образом, исследование влияния пульсаций потока на распределение коэффициента теплоотдачи на начальном участке будет способствовать выявлению основных закономерностей таких течений. Основной интерес здесь представляет взаимодействие пульсаций с процессами во входном устройстве канала.

Исследования проводились на экспериментальной установке (рис. 1), рабочий участок 3 которой представлял собой плоский канал длиной 1,2 м и сечением $115 \times 150 \text{ мм}^2$. Входное устройство 1 в одной плоскости было сформировано по лемнискате Бернулли. Пульсации потока воздуха в установке создавались пульсатором 4, в котором проходное сечение на выходе из канала периодически перекрывалось вращающейся заслонкой. Температура поступающего из окружающей среды воздуха измерялась термометром сопротивления 5. Теплообменная стенка 2 представляла собой пластину (печатную плату) из стеклотекстолита толщиной 1,6 мм со слоем теплоизоляции снаружи. Медный слой на поверхности платы был вытравлен в виде дорожки, участки которой функционально представляли собой термометры сопротивления. Термометры измеряли локальные значения температуры стенки в опытах с определенным шагом по длине, по которым на основе уравнения теплового баланса определялись коэффициенты теплоотдачи.

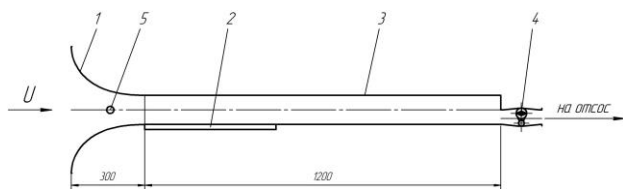


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – входное устройство; 2 – теплообменная стенка; 3 – рабочий участок; 4 – пульсатор; 5 – термометр.

Теплоотдача исследовалась при охлаждении предварительно нагретой стенки потоком воздуха комнатной температуры. Опыты проводились в диапазоне вынужденных частот $f=(0-140) \text{ Гц}$ и двух уровнях относительных амплитуд скорости $\beta=A_U/U \sim 0,3$ и $\beta \sim 0,8$.

Характерные распределения коэффициента теплоотдачи α при среднерасходной скорости потока $U=1,8 \text{ м/с}$ ($Re=1,5 \cdot 10^4$) приведены на рис. 2. За начало координат $x=0$ здесь взято входное сечение рабочего участка (на стыке с входным устройством).

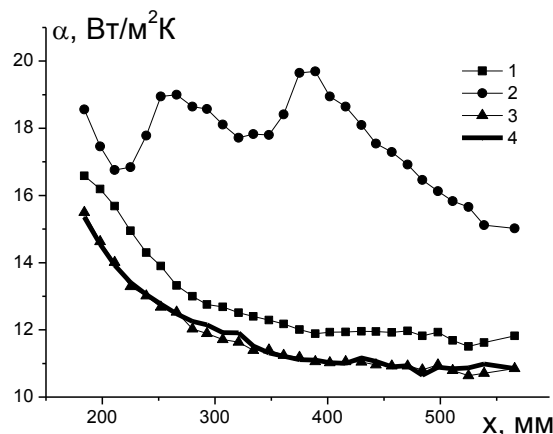


Рис. 2. Коэффициент теплоотдачи на режимах 12 Гц (1) и 40 Гц (2) при $\beta \sim 0,8$, 140 Гц (3) при $\beta \sim 0,3$, стационарном (4).

Распределение коэффициента теплоотдачи на стационарном режиме хорошо согласуется с классическими представлениями о теплообмене на начальном участке канала. Пульсации потока на низкой частоте и низкой амплитуде показали одинаковое со стационарным режимом распределение при небольших отклонениях величин. По-видимому, структура течений здесь может считаться квазистационарной. С ростом частоты (40 Гц) существенно меняется характер распределения – наблюдается немонотонность с несколькими экстремумами и интенсификация теплообмена почти до двукратного уровня. Данный факт может свидетельствовать о формировании крупномасштабных вихревых структур во входном устройстве.

На всех частотах по длине канала наблюдалось снижение значений коэффициента теплоотдачи до стационарных. На расстоянии $x \sim 1 \text{ м}$ (~ 8 калибров) их отличие не превышало 8%.

Список литературы:

1. Тепловые и гидродинамические процессы в колеблющихся потоках / Б.М. Галицейский, Ю.А. Рыжов, Е.В. Якуш. М.: Машиностроение, 1977. 256 с.
2. Турбулентное течение газа при гидродинамической нестационарности / Дрейсер Г.А., Краев В.М. Красноярск: Сиб. аэрокосм. акад. 2001. 147 с.
3. Давлетшин И.А., Михеев Н.И. Структура течения и теплообмен при отрыве пульсирующего потока / ТВТ. 2012. Т. 50, №3. с. 442-449.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10336).

ГИБРИДНЫЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В РАЗНОМАСШТАБНЫХ (1D-3D) МОДЕЛЯХ

Дектерев А.А.^{1,2}, Филимонов С.А.¹, Михненко Е.И.², Бойков Д.В.¹

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

² Сибирский Федеральный Университет

E-mail: dekterev@mail.ru

Работа посвящена применению разномасштабных моделей при моделировании гидродинамики и теплообмена в больших и/или сложных системах, в которых можно выделить протяженные и «компактные» элементы. Разномасштабной называется модель, в которой одновременно присутствуют трехмерные и сетевые (одномерные) элементы (см. рис. 1).

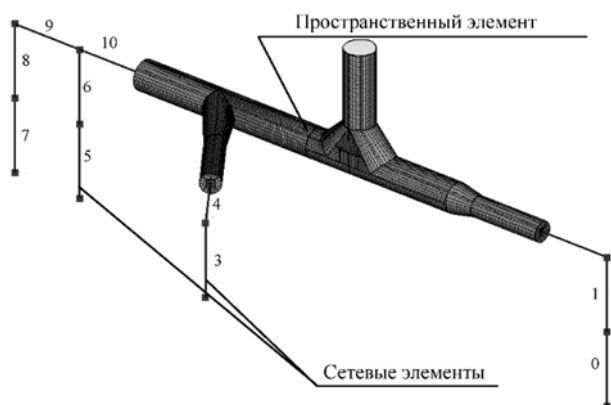


Рис. 1. Пример разномасштабной модели

Под протяженными элементами подразумеваются такие, в которых соотношение характерных размеров отличается в 10-1000 раз, например: трубопроводы, каналы, газоходы и др. Для исследования таких объектов обычно используется сетевое (гидравлическое) моделирование [1-4]. При этом расчёт искомых характеристик такой системы (давление, скорость, температура и т.д.) осуществляется методами теории гидравлических цепей (ТГЦ) [1]. В «компактных» объектах, то есть в объектах, отношение характерных размеров которых отличаются в 1-10 раз, применяют методы вычислительной гидродинамики (CFD) [5-9]. В основе данных методов лежит численное решение уравнений Навье-Стокса. В результате расчёта получаются поля характеристик исследуемого объекта, распределённые по объёму, например: скорость, давление, температура, концентрации, турбулентные характеристики и др.

В работе исследована актуальность построения таких моделей. Рассмотрены три основных способа их реализации:

1. пространственная и сетевая части рассчитываются по отдельности;
2. гидравлически единая модель: пространственная и сетевая части рассчитываются одновременно;

3. гидравлически не связанная модель: сетевые элементы «пронизывают» пространственную часть, и связь происходит с помощью интегральных характеристик на стенках трубы/канала.

Для каждого способа описываются свои достоинства и недостатки. А также приведён ряд практических примеров применения разномасштабных моделей. Представлены примеры расчёта, выполненные при помощи программных продуктов, в разработке которых авторы принимали участие.

При использовании первого способа было использовано два программных продукта: сетевая часть задачи моделировалась в SigmaNet: программе для численного моделирования потокораспределения в технологических сетях; пространственная часть - в SigmaFlow: программном комплексе моделирования потока газа или жидкости и его взаимодействия с окружающими телами.

Для применения второго и третьего способа функционал SigmaFlow был расширен: добавлена возможность решения сетевых моделей, организовано взаимодействие между пространственными и сетевыми элементами разномасштабной модели, реализован предложенный метод решения уравнений для получения единого непрерывного поля давления.

1. Меренков А.П., Хасилев В.Я. Теория гидравлических цепей. М - "НАУКА", 1985.
2. Атавин А. А. Расчет неустановившегося течения воды в разветвленных системах речных русел или каналов // В сб.: Динамика сплошной среды. 1975. № 22. С. 25-36.
3. Сухарев М.Г., Ставровский Е.Р. Оптимизация систем транспорта газа. Т. 6. М.: Недра, 1975. 48-52 с.
4. Todini, E. Unmetodo del gradiente per la verificadelleretiidrauliche // Bollettino degli Ingegneri della Toscana, Vol. 11, 1979. pp. 11-14.
5. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. - М.: Энергоатомиздат, 1984.
6. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкости. Vol 1-2. М.: Мир, 1991. 1054 pp.
7. Андерсон Д. Т.Д.П.Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. М.: Мир, 1990. 726 pp.
8. J. H. Ferziger, M. Peric. Computational Methods for Fluid Dynamics 3, rev. edition. Springer, 2002.
9. Быстров Ю.А. Исаев С.А., Кудрявцев Н.А., Леонтьев А.И. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб. СПб: Судостроение, 2005. 392 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ВИБРАЦИЙ ГИДРОАГРЕГАТА, ВЫЗВАННЫХ ПУЛЬСАЦИЯМИ ДАВЛЕНИЯ В ПОТОКЕ

Дектерев Д.А.^{1,2}, Минаков А.В.^{1,2}, Платонов Д.В.^{1,2}, Масленникова А.В.², Абрамов А.В.²,

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

² Сибирский Федеральный университет

E-mail: dekterev_da@mail.ru

Известно, что при работе гидроагрегатов ГЭС существуют оптимальные и неоптимальные режимы. В зоне неоптимальных режимов, в потоке за колесом гидротурбины начинает формироваться устойчивая вихревая структуры, имеющие ярко выраженную частоту прецессии. Прецессирующее вихревое ядро (ПВЯ) приводит к генерации низкочастотных пульсаций давления большой амплитуды [1, 2], наиболее опасных в случае возникновения резонанса с элементами конструкции гидроагрегата.

Открытым остается вопрос, какой вклад вносят пульсации давления, связанные с прецессией вихревого ядра, в генерацию низкочастотных вибраций гидроагрегата. В данной работе на крупномасштабном гидродинамическом стенде с моделью гидротурбины ГЭС проводится исследования, направленные на установление взаимосвязи между пульсациями давления за колесом гидротурбины и вибрационным состоянием стенда.

Рассматриваются режимы работы гидроагрегата для постоянного напора, равного 350 см, и открытиях направляющего аппарата 1/15 – 8/15 (открытие 9/15 соответствует оптимальному режиму работы гидротурбины). С помощью пьезоэлектрических датчиков давления происходит запись пульсаций давления в конусе отсасывающей трубы. Определяется частота и амплитуда пульсаций. В то же время виброизмерительные преобразователи ВД06А фиксируют уровень вибраций гидроагрегата на фланце конуса. При помощи оптического тахометра определяется частота вращения рабочего колеса.

Быстрое Фурье преобразование сигналов с датчиков вибрации отображает наличие в спектре очевидных пиков на частотах, соответствующих частоте прецессии вихря, оборотной частоте рабочего колеса, а так же их комбинациям. На рисунке 1 представлен спектр вибраций для открытия 4/15. Пик на частоте 1,9 Гц соответствует частоте ПВЯ, пик на частоте 7,3 Гц соответствует оборотной частоте рабочего колеса.

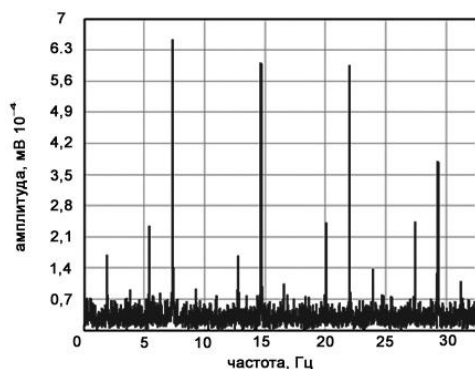


Рис. 1. Спектр вибраций конуса отсасывающей трубы гидротурбины

Данный факт даёт основания утверждать о существенном влиянии прецессирующего вихря на возникновение низкочастотных вибраций конструкции гидроагрегата.

Для борьбы с ПВЯ применяют как конструктивные методы (ребра, крестовины...) [3], так и альтернативные. Влияние подачи воздуха в поток на характеристики прецессирующего вихревого ядра исследовано в работе [4]. Отмечается изменение частоты прецессии и значительное снижение амплитуды пульсаций давления при определенных процентных соотношениях воды и воздуха. В таком случае, снижение амплитуды пульсаций давления должны вести к уменьшению уровня вибрации гидроагрегата.

В проточный тракт подавался фиксированный объем воздуха, соответствующий 3,6% от расхода воды при открытии 1/15 и 1,4% при открытии 8/15. На рисунке 2 показано значительное снижение вибрации при открытиях 1/15 – 5/15 (в зоне наибольших вибраций без воздуха) и усиление вибрации при открытиях близких к оптимальным (7/15 – 8/15).

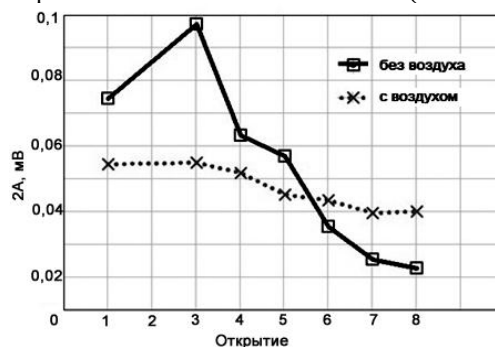


Рис. 2. Размах вибраций конуса отсасывающей трубы

Подобная зависимость наблюдается и у пульсаций давления, это позволяет утверждать о целесообразности применения подачи воздуха в тракт гидротурбины при неоптимальных режимах работы.

1. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки. М.: Мир, 1987. стр. 588.
2. Алексеенко С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2003. стр. 504.
3. Семёнов Г.А., Смирнова А.Ю., Дектерев А.А., Минаков А.В., Сентябов А.В., Численное исследование конструктивных способов подавления низкочастотных пульсаций давления в отсасывающей трубе гидротурбины, Труды Академэнерго, 2013, №3, с. 26 – 40
4. Alekseenko S.V., Kuibin P.A., Okulov V.L., Shtork S.I., Vortex precession in a gas-liquid flow, Heat transfer research, 2010, volume 41, number 4, pp. 465-477

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Красноярского края в рамках научного проекта № 16-48-243076

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В УПРУГОЙ ТРУБЕ МОДЕЛИРУЮЩЕЙ АРТЕРИЮ

Денисенко Н.С.^{1,3}, Черевко А.А.^{1,3}, Кулик В.М.², Чупахин А.П.^{1,3}

¹ Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

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

³ Новосибирский государственный университет

E-mail: raselkroy@gmail.com

Задача о течении крови в артериях является одной из основных для гемодинамики [1-2]. Её важность связана прежде всего с различными заболеваниями сердечно-сосудистой системы человека (артериальная гипертония, атеросклероз, венозные патологии и т.д.). Изучение течения крови в живых системах связано с большими трудностями. Поэтому для разработки новых и совершенствования существующих методов исследования течения крови в артериях, переходят от живых систем к лабораторным моделям. На моделях сосудистой системы проводятся исследования, как фундаментальные так и прикладные. В медицине они используются в доклинических исследованиях, как тренировочное оборудование нейрохирургам, для разработки методов лечения сосудистых аномалий и оценки их успешности.

В работе представлены экспериментальные исследования течения вязкой жидкости в цилиндрических силиконовых моделях, моделирующих прямой участок артерии. Силиконовая модель представляет собой сплошной цилиндр длиной 200 мм, внешним диаметром 30 мм и внутренним диаметром 7.5 мм (характерный диаметр сонной артерии). Для экспериментального исследования изготовлено 4 силиконовые модели, 3 из них сделаны из силикона (смесь силикона СКТН-А и силиконового масла ПМС-5) и имеют следующий модуль Юнга 8.15 МПа, 6.61 МПа, 5.12 МПа (силиконовое масло используется для изменения модуля Юнга). Четвертая модель выполнена из оргстекла. Модели подключаются при помощи соединительных трубок к программируемому насосу CompuFlow 1000 MR. Измерения скорости и давления проводятся внутрисосудистым датчиком ComboWire (ННИИПК) [3-5]. Все измерения параметров течения в моделях проводились с использованием одного протокола исследования. Датчики ComboWire устанавливаются на расстоянии 10 см друг от друга и располагаются симметрично относительно центра модели. Насос генерирует периодическое течение в котором расход задается следующей формулой: $Q + A \sin(K \pi t)$, $Q \in [0, 15]$, $A = 3, 6, 9$, $K = 1, 2, 3$ кроме того, задается расход характерный для течения в сонной артерии человека.

Для математического описания течения вязкой, несжимаемой жидкости в цилиндрической трубе используются аналитические формулы выведенные Вомерсли [6]. Рассматривается два случая. Первый случай - течение жидкости в трубе с твердыми стенками. В этом случае рассматривается осесимметричное течение, описываемое системой уравнений Навье-Стокса для вязкой, несжимаемой жидкости, на границе ставится условие прилипания и градиент давления зависит периодическим образом от времени. Во втором случае учитывается влияние упругости стенок на течение в трубе, для описания этого явления используется модель оболочек [7].

В работе проведено экспериментальное исследование периодических течений вязкой жидкости в моделях с различными упругими свойствами. Проведено сравнение формул полученных Вомерсли с экспериментальными данными, показавшее их хорошую взаимную согласованность.

1. Педли Т. Гидродинамика крупных кровеносных сосудов: Пер. с англ // М.: Мир, 1983. 400 с.
2. Левтов А.В., Регирер С.А., Шадрин Н.Х. Реология крови // М.: Медицина, 1982. 272 с.
3. Denisenko N.S., Chupakhin A.P., Khe A.K., Cherevko A.A., Yanchenko A.A., Tulupov A.A., Boiko A.V., Krivoschapkin A.L., Orlov K.Yu., Moshkin M.P., Akulov A.E. Experimental measurements and visualisation of a viscous fluid flow in Y-branching modelling the common carotid artery bifurcation with MR and Doppler ultrasound velocimetry // Journal of Physics: Conference Series. 2016. №722.
4. Панарин В.А., Орлов К.Ю., Кривошапкин А.Л., Чупахин А.П., Черевко А.А., Хе А.К., Телегина Н.Ю., Баранов В.И. Использование гидродинамических расчетов в выборе сценария эмболизации церебральной артериовенозной мальформации с фистульным компонентом // Патология кровообращения и кардиохирургия. 2012. 16. №3. 39-43 с.
5. Чупахин А.П., Черевко А.А., Хе А.К., Телегина Н.Ю., Кривошапкин А.Л., Орлов К.Ю., Панарин В.А., Баранов В.И. Измерения и анализ локальной церебральной гемодинамики у больных с сосудистыми мальформациями головного мозга // Патология и кровообращение. 2012. 16. №4. 27-31 с.
6. Womersley J. R. Oscillatory motion of a viscous liquid in a thin-walled elastic-tube - I: linear approximation for long waves // Philosophical magazine. 1955. №46. 199 p.
7. Lamb H. On the velocity of sound in a tube as influenced by the elasticity of the walls. // Manchester Memoirs, proceeding of the Manchester Literary and Philosophical Society. 1898. 42 №9.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (грант № 17-08-01736) и гранта Правительства Российской Федерации (грант № 14.W03.31.0002).

МЕТОД ФУНКЦИИ ПЛОТНОСТИ ВЕРОЯТНОСТИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕПЛО И МАССОПЕРЕНОСА В ГАЗОДИСПЕРСНОМ ПОТОКЕ С УЧЕТОМ ГОРЕНИЯ ЧАСТИЦ И МЕЖЧАСТИЧНЫХ СТОЛКНОВЕНИЙ

Деревич И.В., Щадинский Д.М.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Россия

E-mail: DerevichIgor@bmstu.ru

Двухфазные турбулентные потоки реагирующих частиц или капель широко используются в различных технических приложениях. Например, камеры двигателей внутреннего сгорания, авиационные двигатели, теплоэлектростанции, аппараты химической технологии. Несмотря на широкий спектр практического использования двухфазных реагирующих потоков методы математического моделирования процессов тепло и массопереноса разработаны слабо.

Популярный метод описания Лагранжа движения и теплопереноса отдельных реагирующих частиц сравнительно легко реализуется численными методами при известном поле скорости и температуры несущей среды. Стандартный метод моделирования траекторий и температур частиц реализуется на основе решения системы стохастических дифференциальных уравнений с дельта-коррелированным во времени случайным шумом – источником флуктуаций скорости и температуры несущей среды. Это приближение соответствует частицам инерционной примеси. При описании Лагранжа возникают также проблемы при моделировании вихревых течений с эффектом накопления частиц, учет столкновений частиц друг с другом и с поверхностью омываемой двухфазным турбулентным потоком.

В работе развивается замкнутое описание двухфазного дисперсного турбулентного потока с химически реагирующими частицами на основе метода функции плотности вероятности (ФПВ). Учитываются столкновения частиц друг с другом и с ограничивающей поверхностью.

На основе уравнений динамики и уравнения для температуры частиц с учетом экзотермической химической реакции записывается незамкнутое уравнение для ФПВ. В скорости химической реакции на поверхности частиц учитывается зависимость от концентрации газообразного окислителя в потоке.

Замыкание уравнения осуществляется современными функциональными методами в теории случайных процессов. Столкновение частиц друг с другом описывается на основе модели интеграла столкновений БГК (Бхатнагара-Гросса-Крука). Это приближение дает возможность описывать и неупругие столкновения, приводящие к перераспределению импульса и температур частиц. В уравнении для ФПВ содержатся новые слагаемые, связанные с тепловыделением и приводящие к интенсивной диффузии в фазовом пространстве температур.

На основе полученного замкнутого уравнения для ФПВ получены незамкнутые уравнения для осредненной скорости и температуры в дисперсной фазе, а также вторых моментов флуктуаций скорости и

температуры с учетом тепловыделения и межчастичных столкновений. Расчет третьих моментов реализуется на основе приближенного аналитического решения уравнения для ФПВ в приближении линейном по градиентам осредненных скорости, температуры и концентрации частиц. Показано, что интенсивность турбулентного переноса тепла в дисперсной среде зависит не только от степени вовлечения частиц в турбулентное движение несущей среды, но и от флуктуаций скорости химических реакций.

Иллюстрируется эффект стремления к изотропии вторых моментов флуктуаций скорости и температуры частиц в результате столкновений.

Предложена простая модель, учитывающая ослабление степени вовлечения частиц в турбулентные флуктуации скорости и температуры несущей среды.

Приближенное решение уравнения для ФПВ позволяет получить граничные условия на твердой поверхности, ограничивающей двухфазное течение. Учитывается потеря импульса частиц с поверхностью, теплообмен между частицами и поверхностью за время контакта. Показано, что в тепловой поток, уходящий на стенку, существенный вклад дает тепловой поток за счет флуктуаций скорости химической реакции.

Обсуждаются различные формы записи интеграла столкновений в форме БГК для случая неупругого столкновения и коагуляции частиц.

Для полидисперсного потока представлены частные случаи разбиения на фракции, формы столкновительного слагаемого в уравнении для ФПВ учетом коагуляции частиц.

Представлены результаты численных расчетов уравнения для концентрации частиц для модельных случаев.

Работа поддержана РФФИ (грант № 17-08-00376).

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

Генбач А.А.¹, Джаманкулова Н.О.²

^{1,2}Алматинский университет энергетики и связи, Алматы, Республика Казахстан

E-mail: jnelya@gmail.com

Капиллярно-пористый теплообменник предназначен для обеспечения взрывобезопасности работы высокотемпературных агрегатов, например, плавильных в металлургии. Он содержит малое количество жидкости и, в случае прогара элемента охлаждения, исключается попадание воды в расплав, которое приводит к взрыву печи, как это имеет место для водяной и испарительной систем охлаждения, выполненных в виде кессонов.

Следующим этапом разработок теплообменника явилось исследование капиллярно-пористой структуры. Для расширения отвода тепловых нагрузок применяется управление процессами теплопередачи. Для этого исследуется разделение энергии кипящего потока в структуре на энергию тепловой волны и энергию парового потока [1].

Имитируется процесс взрывообразного рождения парового зародыша. Управление теплообменом, применяемое для транспорта охладителя - совместное действие массовых и капиллярных сил, создающих недогрев и вынужденную скорость потока в структуре [2]. Также система способна на порядок увеличить критические тепловые нагрузки и может быть выделена в отдельный класс теплообменников, отличающихся высокой форсировкой и интенсивностью теплопередачи. Кроме того, массовые силы позволяют управлять формой, очертаниями и интенсивностью генерации, внутренние характеристики кипящего потока в капиллярно-пористой структуре интенсифицируют процессы теплопередачи [3,4]. Разрабатываются физико-математические модели процессов кипения в пористой структуре для всех режимов кипения (начального, переходного, развитого и кризиса (предельного)) [5-6]. Обобщение опытных данных на основе теории подобия, моделирования и аналогий позволяет получить критериальное уравнение для расчета теплообмена кипящих и пенных потоков в пористых структурах [7] и создать инженерную методику расчета. Проведен расчет капиллярно-пористой системы охлаждения применительно к теплообменнику, выполненного в виде коробчатой формы (кессона). Описано конструктивное исполнение кессонов, которое представляет коробчатую форму.

Определено гидравлическое сопротивление сетчатой структуры, работающей только в поле капиллярных сил, как это имеет место в тепловых трубках. Расчет показал, что гидравлическое сопротивление предлагаемой структуры будет в 404 раза меньше. При сравнении сетчатых структур

с металлокерамическими, войлочными и порошковыми материалами, для которых максимальное значение проницаемости может составить $11 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$, что всего в 1,54 раза больше, чем для сетчатых структур, работающих в поле капиллярных сил, а гидравлическое сопротивление – в 1,54 раза меньше. Проведен расчет коэффициента теплоотдачи с помощью критериального уравнения [7], полученного нами в результате обобщения опытных данных при кипении воды в капиллярно-пористой структуре, работающей в поле капиллярных и массовых сил. Полученное значение температуры стенки удовлетворяет условиям надежной работы оборудования.

Таким образом, в предлагаемой капиллярно-пористой структуре, которая работает при комбинированном действии массовых и капиллярных сил, гидравлическое сопротивление при кипении воды будет в 40,4 раза меньше, чем в тепловых трубках с мелкоячеистыми сетками, и тем более с волокнистыми и керамическими материалами, что позволяет охлаждать поверхности нагрева больших размеров применительно к кессонам плавильных печей.

Список литературы

- [1] Polyayev V.M., Genbach A.N., Genbach A.A. Methods of Monitoring Energy Process//Experimental thermal and fluid science, International of Thermodynamics, Experimental Heat Transfer, and Fluid Mechanics, avenue of the Americas.-New York,1995, V.10, april, -pp. 273-286.
- [2] Генбач А.А., Федоров В.Н., Шелгинский А.Я. Интенсивность теплообмена при кипении жидкости в капиллярно-пористых структурах в поле массовых сил //Труды МЭИ. – 1980. – Вып.448. – Тепло массообменные процессы и установки. – С.27-32.
- [3] Поляев В.М., Генбач А.А. Плотность центров парообразования и выброс капель из пористой структуры // Известия вузов. Машиностроение. -1990, №9. -С.50-55.
- [4] Поляев В.М., Генбач А.А. Отрывной диаметр и частота отрыва паровых пузырей в пористых структурах// Вестник МГТУ. Соз. Машиностроение.-1990.№1-С.69-72.
- [5] Поляев В.М., Генбач А.А. Начальная область парообразования в пористых структурах, работающих с избытком жидкости// Известия вузов. Энергетика.-1991.№2.- с.84-87.
- [6] Поляев В.М., Генбач А.А. Механизм процессов парообразования в пористой системе охлаждения // Теория рабочих процессов в узлах и трактах энергетических установок: Сборник трудов МАИ. – М.,1991. – С.81-90.
- [7] Polyayev V., Genbach A. Heat Transfer in a Porous System in the Presence of Both Capillary and Gravity Forces // Thermal Engineering. - M. 1993. V.40, number 7. - p.551-554.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНОГО ТЕПЛО- МАССООБМЕНА ПРИ ГАЗИФИКАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ В ШАХТНОЙ ПЕЧИ С ПЛАЗМЕННО-ОМИЧЕСКИМ НАГРЕВОМ**А.С. Аньшаков^{1,2}, А.И. Алиферов², П.В. Домаров^{1,2}, В.А. Синицын¹, А.Э. Урбах¹**¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск² Новосибирский государственный технический университетE-mail: Domaroff@yandex.ru

В современном мире остро стоит задача утилизации и обезвреживания техногенных отходов, количество которых с каждым годом увеличивается. Одним из эффективных путей решения этой проблемы является газификация отходов в шахтных плазменных печах. Плазменные установки - это новый тип оборудования, применяемый для переработки и утилизации техногенных (бытовых, промышленных, сельскохозяйственных и др.) отходов.

Плазменные технологии позволяют перерабатывать техногенные отходы без промежуточного передела, получая из них экологически безопасный шлак и высококалорийный синтез-газ для ряда техногенных отходов.

При разработке многопараметрического электро-технологического оборудования для плазменной переработки техногенных отходов необходимо разработать физико-математическую модель процесса тепло- массообмена в условиях плазменного нагрева с дополнительным омическим нагревателем.

Моделирование теплообмена для условий шахтной плазменно-омической печи осложнено различными электрофизическими и физико-химическими процессами: комбинированным тепло- массообменом в двухфазной системе, сопровождаемым в зоне сушки отходов выделением активной мощности от протекающего по шихте электрического тока и комплексом химических реакций, фазовыми переходами (сублимация, плавление, испарение и конденсация), и поэтому требует применения современных численных методов.

При разработке математической модели тепло-массообмена взята за основу следующая модельная схема шахтной плазменно-омической электропечи. В верхнюю часть печи подается шихта техногенных отходов естественной влажности с заданными начальной температурой и удельным расходом. Навстречу движущейся вниз шихте поднимается газовый поток, нагретый в нижней части печи одним или несколькими плазмотронами с известной температурой и удельным расходом газа. Шихта, перемещаясь

по шахте, подвергается последовательно сушке, пиролизу и газификации органической компоненты отходов. Неорганическая часть техногенных отходов переходит в зоне горения в расплав. Поднимающийся газовый поток насыщается пиролизными газами и водяным паром.

При организации непрерывного технологического процесса в камере печи формируется установившийся газодинамический и тепловой режимы. Поэтому процессы тепло- массообмена в таких условиях встречных потоков твердой и газообразной фаз можно считать стационарными. В качестве граничных условий задаются тепловой поток, подводимый от плазмотрона и удельный расход газа на нижней границе модели, на верхней границе задаются температура входящей шихты с известной влажностью и ее удельный расход.

На основе решения системы уравнений тепло-массообмена рассчитываются температурное поле и переменное поле удельных расходов в шихте и газе. Решение производится на основе разработанного программного продукта.

Результаты расчетно-теоретических исследований могут быть использованы для определения протяженности всех тепловых зон при разработке методики расчета реакционных объемов плазменных технологических аппаратов с целью оптимизации их габаритных размеров. По мимо этого определяется местоположение максимального тепловыделения за счет химических реакций и зона отбора синтез-газа с высокой калорийностью. Кроме этого находится оптимальная мощность нагрева шихты при заданной производительности печи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по соглашению о субсидии №14.607.21.0118(уникальный идентификатор проекта RFMEFI60715X0118)

Настоящая работа посвящена исследованию энергетики Черного моря по данным качественных и количественных оценок среднегодовых и средних по сезонам вкладов различных физических процессов в изменение кинетической (КЭ) и потенциальной энергий (ПЭ). Проведен анализ составляющих баланса энергии, рассчитанных с помощью конечно-разностных аналогов уравнений бюджета КЭ и ПЭ на основе вихреразрешающей модели МГИ [1]. Численный эксперимент выполнен на равномерной сетке $1,6 \times 1,6$ км с учетом атмосферного воздействия по данным реанализа ERA-Interim за 2011 г. Пространственное разрешение модели меньше бароклинного радиуса деформации Россби в Черном море (в среднем 8 км), что позволяет воспроизвести мезомасштабные и субмезомасштабные вихревые образования [2]. Полная постановка задачи, граничные и начальные условия, описание блока расчета компонентов бюджета энергии подробно представлены в [3]. В результате эксперимента получены трехмерные поля температуры, солёности, скоростей течений и массивы компонентов бюджета энергии на каждые сутки 2011 г. Реконструированные гидрофизические поля сопоставлены с данными спутниковых и контактных наблюдений [4].

В работе рассмотрены проинтегрированные по объему энергетические потоки осредненные за год и для каждого сезона. На рис. 1 представлена блок-схема составляющих баланса КЭ и ПЭ. В среднем за 2011 г. происходило накопление как КЭ, так и ПЭ. При этом скорость прироста ПЭ была в пять раз выше, чем КЭ, и обмен между КЭ и ПЭ происходил за счет работы силы плавучести $P \leftrightarrow E$. Максимальный вклад в КЭ давала работа силы ветра $\tau \rightarrow E$. Приток от ветра на 72% компенсировался вертикальным трением $Diss_{ver}$.

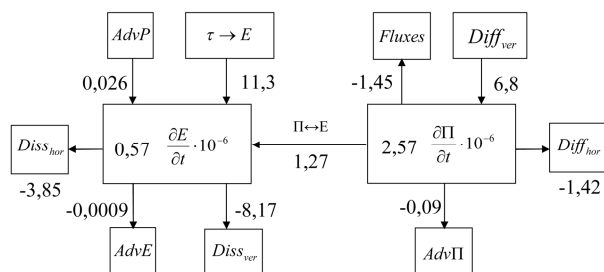


Рис. 1. Осредненные за год компоненты бюджета энергии (10^{-6} эрг/см³ с).

Работа адвективных слагаемых $AdvP$ и $AdvE$ мала, однако не обращаются в ноль при интегрировании, поскольку в модели учитываются сток рек и обмен через Керченский пролив и Босфор. В результате работы сил трения ($Diss_{hor}$) КЭ уменьшилась, и абсолютная величина этого слагаемого в три раза выше вклада от работы силы плавучести.

Основной вклад в интегральный баланс ПЭ вносила вертикальная диффузия $Diff_{ver}$ и величина ее работы превысила остальные компоненты более чем в четыре раза. $Diff_{ver}$ определяется преимущественно стратификацией и изменчивостью коэффициента вертикальной турбулентной диффузии. Данный результат свидетельствует о том, что увеличение ПЭ происходит за счет диффузии. Горизонтальная диффузия $Diff_{hor}$ почти в пять раз меньше вертикальной. Таким образом, в среднем за 2011 г. интегральный баланс КЭ определялся вкладом от ветра и потерей за счет трения, а ПЭ – вертикальной диффузией.

Анализ компонентов бюджета энергии, осредненных по сезонам, показал следующее. Максимальный вклад в КЭ от ветра выявлен зимой и осенью, его компенсация происходила вследствие вертикального трения. Весной и летом за счет сезонной изменчивости поля плотности (интенсификация речного стока и прогрев вод моря) возросли работа силы плавучести и влияние вертикальной турбулентной диффузии, что происходило на фоне ослабления поля ветра.

В результате проведенного исследования получено, что в 2011 г. наблюдалось увеличение полной механической энергии в Черном море. Прирост КЭ происходил в осенне-зимний период за счет работы силы ветра. Анализ гидродинамических характеристик показал, что в это время в системе усилились процессы вертикального перемешивания и наблюдалась интенсификация Основного черноморского течения. В теплые месяцы года прогрев и распреснение верхних слоев моря привели к увеличению вертикальных градиентов плотности, что вызвало рост ПЭ и при этом возросла работа силы плавучести. Таким образом, энергетика Черного моря в 2011 г. определялась ветровым воздействием, потоками плавучести, процессами трения и вертикальной турбулентной диффузии.

1. Демышев С.Г. Численная модель оперативного прогноза течений в Черном море // Изв. РАН. ФАО. 2012. Т. 48, № 1. С. 137–149.
2. Каримова С.С. Статистический анализ субмезомасштабных вихрей Балтийского, Черного и Каспийского морей по данным спутниковой радиолокации // Исследование Земли из космоса. 2012. № 3. С. 31–47.
3. Демышев С.Г., Дымова О.А. Численный анализ мезомасштабных особенностей циркуляции в прибрежной зоне Черного моря // Изв. РАН. ФАО. 2013. Т. 49, № 6. С. 655–663.
4. Морской портал / Электронный ресурс http://dvs.net.ru/mp/data/201105bs_mod_ru.shtml

Работа поддержана РФФИ (грант № 15-05-05423).

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СУПЕРКАВИТИРУЮЩИХ УДАРНИКОВ С МОНОЛИТНЫМИ ПРЕГРАДАМИ В ВОДЕ

Афанасьева С.А.¹, Буркин В.В.¹, Дьячковский А.С.¹, Ищенко А.Н.¹, Чупашев А.В.¹

¹ Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики Томского государственного университета

E-mail: ichan@niipmm.tsu.ru

Преодоление дистанции в воде при высокоскоростном проникании тела и эффективное преодоление подводных преград на глубине представляет сложную техническую задачу, решение которой требует от исследователей развития новых подходов.

Эксперименты по исследованию взаимодействию суперкавитирующих ударников (СУ) с монолитными подводными преградами проводились на гидроballистическом комплексе НИИПММ ТГУ [1].

Исследование движения СУ в воде на скоростях более 1000 м/с показало, что стальные СУ не выдерживают нагрузок и разрушаются при движении в воде [2,3]. Для решения данной проблемы необходимо применять более прочные материалы, например вольфрамовые сплавы, выдерживающие нагрузки при движении в воде в диапазоне скоростей 1000...1500 м/с.

Внешний вид СУ массой около 60 г из сплава ВНЖ предоставлен на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид СУ из ВНЖ.

В качестве подводных преград использовались пластины из алюминиевого сплава Д16Т и стали толщинами 40 и 45 мм соответственно.

На рис. 2 представлены кадры взаимодействия СУ с преградой из сплава Д16Т толщиной 40 мм после прохождения в воде 3.2 м. Скорость СУ перед взаимодействием с преградой составила 1022 м/с. После пробития преграды скорость СУ снизилась до 913 м/с. Высокая величина скорости тела за преградой говорит о большом запасе кинетической энергии в ударнике. Внешнее состояние входного и выходного отверстия в преграде говорит о том, что взаимодействие СУ с преградой было под прямым углом, что говорит о режиме устойчивого движения СУ в воде.

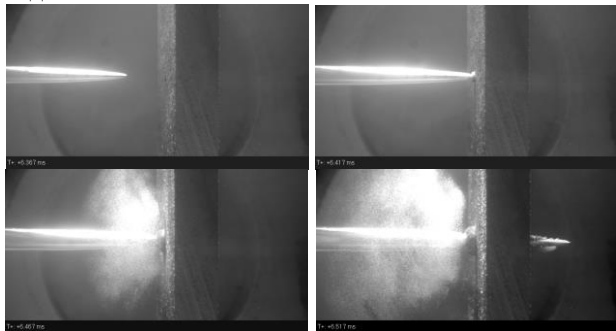


Рис. 2. Поражение дюралевого преграды 40 мм, $V_0 = 1022$.

Анализ взаимодействия СУ при проникании с преградой проводился с применением математической модели, описывающей процесс соударения в

полной пространственной постановке численным методом конечных элементов [4]. Для оценки потенциальной возможности пробития данным СУ проведен расчет показавший, что возможно пробитие стальной преграды толщиной 45 мм.

На рис. 3 представлены кадры взаимодействия СУ со стальной преградой толщиной 45 мм после прохождения в воде 3.2 м. Скорость СУ при встрече с преградой составила 1054 м/с. После пробития преграды наблюдается движение откольного фрагмента массой ~27 г со скоростью ~130 м/с.

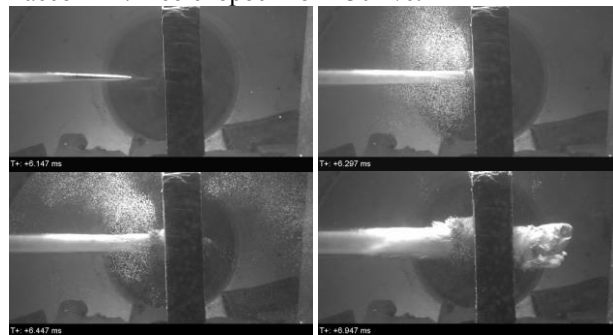


Рис. 3. Поражение брони 45 мм, $V_0 = 1054$ м/с.

При установке преграды на расстоянии 9.0 м от входа в воду наблюдается снижение скорости СУ до 894 м/с, пробития этой же преграды не наблюдается.

Расчетным и экспериментальным способом показано, что СУ массой около 60 г из сплава ВНЖ на скорости более 1000 м/с способен пробить стальную преграду толщиной 45 мм. Последнее накладывает требования к скорости метания для достижения данного показателя на заданной дальности.

Литература

1. Бураков В.А., Буркин В.В., Ищенко А.Н., Корольков Л.В., Степанов Е.Ю., Чупашев А.В., Агафонов С.В., Рогачев К.С. Экспериментальный баллистический комплекс // Патент на изобретение №2591132. Заявка № 2015113676 от 13.04.2015.
2. Afanas'eva S.A., Belov N.N., Burkin V.V., D'yachkovskii A.S., Evtyushkin E.V., Ishchenko A.N., Monakhov R. Yu., Rodionov A.A., Khabibulin M.V., Yugov N.T., Zykov E.N. Special features of high-speed projectile interaction with barriers protected by a water layer // Russian Physics Journal. Изд-во: Springer New York Consultants Bureau, September 2013, Volume 56, Issue 4, P. 370-377.
3. Akinshin R.N., Afanas'eva S.A., Borisenkov I.L., Burkin V.V., D'yachkovskii A.S., Ishchenko A.N., Korol'kov L.V., Moiseev D.M., Khabibulin M.V. Special Features of High-speed Interaction of Supercavitating Solids in Water // AIP Conf. Proc. 2016. Vol. 1698, Paper 040010; doi: 10.1063/1.4937846.
4. Afanas'eva S.A., Burkin V.V., D'yachkovskii A.S., Zykov E.N., Ishchenko A.N., Korol'kov L.V., Monakhov R. Yu., Rodionov A.A., Khabibulin M.V., Chupashev A.V. Theoretical and Experimental Analysis of the High-Velocity Interaction of Solid Bodies in Water // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. March 2014, Volume 87, Issue 2, pp 399-408.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № 9.9036.2017/БЧ

ПРОЦЕССЫ ТЕПЛООБМЕНА В НЕОДНОРОДНО НАГРЕТОМ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЛОЕ ЖИДКОСТИ**Евграфова А.В.¹, Кучинский М. О.², Сухановский А. Н.¹**¹ Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь² Пермский государственный национальный исследовательский университет

E-mail: eav@icmm.ru

В неравномерно нагретой жидкости, находящейся в поле силы тяжести, равновесие, как правило, невозможно. Наличие градиента температуры будет приводить к возникновению конвективных движений, изучению которых посвящен широкий спектр как экспериментальных, так и численных работ.

В последнее десятилетие интерес сместился в сторону изучения конвективных движений от локализованных источников тепла. Актуальность ряда работ обусловлена широким распространением подобного рода систем. В [1] предложена математическая модель процессов теплообмена в радиоэлектронной аппаратуре и электронной техники. Модель представляла собой замкнутую прямоугольную полость с локализованным источником тепла. В [2] численно исследовано распространение примеси от мощного теплового источника в атмосферы (на примере возгорания нефти). В [3] авторы представили результаты по лабораторному моделированию течений вблизи нагретой круглой пластины, расположенной в центре кубической полости (Urban Heat Island Effect). Лабораторный аналог тропического циклона предложен в серии работ Богатырева Г. П. [4]. Исследовано возникновение конвективного вихря во вращающемся слое жидкости над нагретым диском. Показано, что возникающее в такой системе вихревое движение схоже по структуре со структурой урагана, а предложенная конфигурация перспективна для изучения природы циклонов. Дальнейшие исследования конвекции в неподвижных и вращающихся цилиндрических слоях жидкости при наличии локализованного нагрева показали существование в зоне нагрева системы вторичных конвективных валов [5, 6], существенное влияние нагрева и скорости вращения на структуру крупномасштабного вихря [7]. Действительно основной причиной возникновения тропических циклонов полагается взаимодействие силы Кориолиса с массовыми силами, обусловленными неоднородностью нагрева поверхности океана солнечным излучением. А вторичные движения, являясь неотъемлемой частью не только пограничных слоев циклонов и ураганов [8, 9], но и ряда технологических приложений, существенно влияют на процессы массопереноса и определяют интенсивность теплообмена.

В данной работе экспериментально исследованы процессы теплообмена в горизонтальном слое жидкости локально подогреваемом снизу. Постановка задачи максимально приближена к постановке [4, 5, 7].

Экспериментальная модель представляла собой цилиндрический слой жидкости диаметров 300 мм. Нагрев осуществлялся при помощи медного теплообменника диаметром 104 мм, расположенного за-

подлицо с дном модели. Питание нагревателя происходило через источник переменного тока. Температура нагревателя контролировалась с точностью до 0,5 К через Termodat. Высота слоя жидкости составляла 30 мм. В качестве рабочих жидкостей использованы силиконовые масла различной вязкости. Для измерения температуры была использована линейка термодат – 13 термодат, расположенных на расстоянии 10 мм друг от друга. Линейка размещалась по диаметру нагревателя. Было изучено влияние управляющих параметров задачи на интенсивность теплообмена.

1. Шеремет М. А., Мартюшев С. Г. Численный анализ конвективно радиационного теплопереноса в замкнутой воздушной полости с локальным источником энергии // Компьютерные исследования и моделирование. 2014. Vol. 6. P. 383–396.
2. Шварц К. Г., Шкляев В. А. Численное моделирование мезомасштабных вихревых структур вблизи мощного горячего источника примеси в пограничном слое атмосферы // Вычислительная механика сплошных сред. 2009. Vol. 1. P. 96–106.
3. J. Lu, S. Pal Arya, W. H. Snyder, R. E. Lawson, Jr A Laboratory Study of the Urban Heat Island in a Calm and Stably Stratified Environment. Part I: Temperature Field // Journal of Applied Meteorology. 1997. Vol. 36. P. 1377–1391.
4. Bogatyrev, G.P., Excitation of a cyclonic vortex or a laboratory model for a tropical cyclone // Pisma Zh.Eksp. Teor. Fiz. 1990. V. 51. P. 557–559.
5. A. Sukhanovskii, A. Evgrafova, E. Popova Horizontal rolls over localized heat source in a cylindrical layer // Physica D: Nonlinear Phenomena. 2016. Vol. 316. P. 23–33
6. Boubnov B. M., van Heijst G. J. F. Experiments on convection from a horizontal plate with and without background rotation // Experiments in Fluids. 1994. Vol. 16. P. 155–164.
7. A. Sukhanovskii, A. Evgrafova, E. Popova Laboratory study of a steady-state convective cyclonic vortex // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2016. Vol. 142. P. 2214–2223
8. Wurman J., Winslow J. Intense Sub-Kilometer-Scale Boundary Layer Rolls Observed in Hurricane Fran // Science. 1998. Vol. 280. P. 555.
9. J. A. Zhang, K. B. Katsaros, P. G. Black et al. Effects of Roll Vortices on Turbulent Fluxes in the Hurricane Boundary Layer // Boundary-Layer Meteorology. 2008. Vol. 128. P. 173–189.

Работа поддержана РФФИ (грант № 16-31-00150).

**РАСЧЕТЫ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ПРИБРЕЖНЫХ РЕГИОНАХ ЧЕРНОГО МОРЯ
С ВЫСОКИМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ****Евстигнеева Н.А.**

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь

E-mail: naevstigneeva@yandex.ru

Задачи строительства прибрежных и портовых сооружений, туризма, рыболовства, добычи полезных ископаемых и экологического мониторинга неразрывно связаны с исследованием гидродинамики вод шельфовых зон, их перемешивания и обмена с открытыми частями моря. В настоящее время восстановление и изучение пространственно-временной изменчивости гидрофизических полей в прибрежной зоне морей на масштабах нескольких километров является одной из актуальных задач океанологии.

Основной целью данного исследования является реконструкция гидрофизических полей в прибрежных регионах Черного моря в зимний и летний сезоны на основе гидродинамической модели с высоким пространственным разрешением, определение возможных причин формирования мезо- и субмезомасштабных особенностей циркуляции и их зависимости от времени года. Также на основе сравнения с расчетом с более грубым шагом сетки оценить целесообразность применения более мелкого шага сетки при восстановлении мезо- и субмезомасштабной структуры полей. Выбор рассматриваемых областей (прибрежной зоны Южного берега Крыма (ЮБК) и северо-западного шельфа (СЗШ)) обусловлен тем, что они вносят значительный вклад в динамику и энергетику циркуляции Черного моря.

Используемая гидродинамическая модель Черного моря была разработана в Морском гидрофизическом институте под руководством д.ф.-м.н. Демьшева С.Г. [1] и успешно используется для решения задач теоретического и прикладного характера. В [2] модель была адаптирована к условиям прибрежной зоны Черного моря с открытыми границами. В [3] показано, что улучшение пространственного разрешения до несколько сот метров позволяет в численной модели учитывать тонкую структуру рельефа дна и орографию береговой черты, что в свою очередь приводит к более точному количественному и качественному воспроизведению мезо- и субмезомасштабных особенностей прибрежной циркуляции.

Эксперименты 1 и 2 были выполнены для зоны ЮБК в периоды с 1 по 31 января и с 1 по 31 июля 2006 г. соответственно. При расчетах использовалось высокое разрешение (350 м по горизонтали и 38 горизонтов по вертикали) и учитывалось детальное представление рельефа дна с разрешением ~500 м. Шаг по времени 10 с.

Эксперименты 3 и 4 выполнены для СЗШ Черного моря в периоды с 1 по 31 января и с 1 по 31 июля 2006 г. соответственно. При расчете использовалось высокое разрешение (500 м по горизонтали и 44 горизонтов по вертикали). Шаг по времени 10 с. Учитывался интерполированный на сетку 500×500 м уточненный рельеф дна (с разрешением ~1,6 км). При расчетах учитывался сток рек.

По результатам моделирования для области ЮБК в зимний период было характерно доминирование Основного черноморского течения (ОЧТ), вихревые образования различных знаков вращения с диаметрами менее 8 км были получены при обтекании ОЧТ неоднородностей рельефа дна и береговой орографии в верхнем слое между береговой линией и ОЧТ (возле м. Аю-Даг, на востоке области, в Ялтинском заливе).

Для области ЮБК в летний период отмечено некоторое ослабление струи ОЧТ, в верхнем слое между береговой линией и ОЧТ генерировались антициклонические вихревые образования с радиусом около 20 км, перемещающиеся по направлению движения ОЧТ, возможным механизмом формирования которых являлась бароклинная неустойчивость ОЧТ. Субмезомасштабные особенности циркуляции с диаметрами менее 5 км были восстановлены в верхнем слое воды в Ялтинском заливе и на востоке области. Возможный механизм формирования – обтекание ОЧТ очертаний береговой линии ЮБК и неоднородностей рельефа дна.

Поле течений СЗШ и в зимний, и в летний периоды обладало сложной мезомасштабной структурой, характеризующейся вихревыми образованиями и струями. Вихри различных размеров и знаков вращения были получены в верхнем слое воды вблизи устья р. Днестр, г. Одесса, в центральной части области, в Тендровском заливе, у открытой границы и в Каркинитском заливе. Возможный механизм формирования вихрей в центральной части области – следствие влияния неоднородностей рельефа дна на поток жидкости. Рельеф дна также играл существенную роль в формировании струйных течений в западной части области. Меандрирование этих течений могло приводить к образованию вихрей с радиусом ~10 км различных знаков вращения.

По сравнению с ранее проведенными расчетами за счет более высокого пространственного разрешения и уточненной топографии дна и береговой черты получены новые мезо- и субмезомасштабными вихри и струйные течения, некоторые из которых были подтверждены данными наблюдений.

1. Демьшев С.Г., Коротаев Г.К. Численная энергосбалансированная модель бароклинных течений океана на сетке C // Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане. М.: ИВМ РАН, 1992. С.163–231.
2. Демьшев С.Г., Евстигнеева Н.А. Анализ гидрофизических полей на северо-западном шельфе Черного моря // Океанология. 2013. Т. 53, № 5. С. 585–595.
3. Демьшев С.Г., Евстигнеева Н.А. Моделирование мезо- и субмезомасштабных особенностей циркуляции у восточного берега Крыма на основе численного расчета // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2016, Т. 52, № 5. С. 628–638.

Работа поддержана РФФИ (грант № 15-05-05423 А).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ ФРЕОНА 134А В ЦИКЛИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ КИПЕНИЯ – КОНДЕНСАЦИИ ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ УРОВНЯ РАБОЧЕГО ОБЪЕМА

Мелешкин А.В., Елистратов Д.С., Чернов А.А., Пильник А.А.

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

E-mail: mav@itp.nsc.ru

Ранее авторами работы были проведены экспериментальные исследования по получению газогидратов различных газов разными способами. Все эти способы главным образом основывались на ударно-волновом воздействии на газожидкостные среды [1-4]. Отличительной их особенностью была высокая скорость гидратообразования, что, прежде всего, обусловлено существенной интенсификацией тепломассообменных процессов.

В настоящей работе представлены экспериментальные исследования гидратообразования фреона 134а в циклическом процессе его кипения – конденсации при варьировании уровня рабочего объема. Исследования выполнялись на установке, рабочий участок которой представлял собой параллелепипед длиной 740 мм (сечение 150*150 мм), изготовленный из нержавеющей стали с толщиной стенок 15 мм. Наличие двух смотровых окон в рабочем участке позволяло фиксировать происходящие процессы с помощью видеосъемки. Для измерения давления и температуры были установлены датчики ПД-100 и ДТС204-РТ100. Данная установка обеспечивала возможность исследования процессов гидратообразования при высоких давлениях (диапазон рабочих давлений от 1 до 100 бар) и низких температурах (до -10 °С). Охлаждение установки осуществлялось через боковые стенки посредством водяной рубашки, в то время как нижняя часть установки подогревалась, что приводило к кипению фреона в нижней части сосуда.

Суть эксперимента заключалась в следующем. Рабочий участок заполнялся водой на высоту 100, 200 и 400 мм. В начальный момент времени вода охлаждалась до температуры 2 - 4 °С. Далее в сосуд подавался газообразный фреон 134а. Фреон быстро конденсировался на поверхности воды и падал каплями на дно установки, формируя жидкий слой. Нижняя часть рабочего участка подогревалась до температуры, при которой происходило вскипание слоя фреона. При подъеме вверх по столбу жидкости пузырьки фреона попадали в захлажденную область (где возможно гидратообразование), в результате чего на их поверхности начинала нарастать гидратная пленка. Выделяемое при этом тепло заведомо компенсировалось теплоотводом в окружающую среду. На поверхности воды пузырьки разрушались, оставляя после себя хлопья газогидрата. Пары фреона, не перешедшие в газовый гидрат, снова конденсировались и падали на дно сосуда, где смешивались с кипящим слоем жидкого фреона. Очевидно, рассматриваемый процесс являлся

циклическим и продолжался до тех пор, пока весь жидкий фреон, выкипая, не перешел в газогидрат (рис. 1).

При обработке видеосъемки были получены зависимости роста слоя газогидрата от времени, с помощью чего было определено влияние уровня рабочего объема на процесс гидратообразования.



Рис. 1 Газогидрат, полученный в ходе эксперимента

Список литературы

1. A.A. Chernov, V.E. Dontsov The processes of dissolution and hydrate forming behind the shock wave in the gas-liquid medium with gas mixture bubbles // International Journal of Heat and Mass Transfer 54 (2011) pp. 4307–4316.
2. V.E. Nakoryakov, I.V. Mezentssev, A.V. Meleshkin, D.S. Elistratov, and A.Yu. Manakov Experimental Investigation of Gas-Hydrate Formation by Underwater Boiling of a Condensed Gas Layer // Journal of Engineering Thermophysics. 2015, Vol. 24, № 4.
3. Chernov A.A., Pil'nik A.A., Elistratov D.S., Mezentssev I. V., Meleshkin A.V., Bartashevich M.V., Vlasenko M.G. New hydrate formation methods in a liquid-gas medium // Scientific Reports. 2017. Vol. 7, 40809.
4. Chernov A.A., Elistratov D.S., Mezentssev I.V., Meleshkin A.V., Pil'nik A.A. Hydrate formation in the cyclic process of refrigerant boiling-condensation in a water volume // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. Vol. 108, Part B. P. 1320–1323.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-10025).

Быковский Ф.А.¹, Ждан С.А.¹¹ Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

E-mail: zhdan@hydro.nsc.ru

Результаты изучения непрерывной спиновой детонации (НСД) по схеме Б.В. Войцеховского [1], вызывающие в последнее время интерес во всем мире, обобщены в книге [2]. Цель настоящей работы – реализация, исследование и анализ НСД в проточной кольцевой цилиндрической камере сгорания диаметром 503 мм (ДК-500) трех топливно-воздушных смесей (ТВС): синтез-газ – воздух, CH_4/H_2 -воздух, керосин/ H_2 – воздух.

Эксперименты проведены в ДК-500 (кольцевая щель для подачи воздуха $\delta = 3,5$ мм, кольцевой зазор между стенками камеры $\Delta = 18$ мм, длина $L_c = 490 \div 540$ мм). Истечение продуктов происходило в окружающую атмосферу с давлением $p_a = 10^5$ Па.

Результаты экспериментов. В ТВС $\text{CO} + 2\text{H}_2 +$ воздух в диапазоне удельных расходов смеси $g_\Sigma = 39 \div 240$ кг/(с·м²) и коэффициента избытка горючего $\phi = 1.04 - 1.29$ были осуществлены многоволновые ($n = 2 \div 3$) режимы НСД с частотой вращения поперечных детонационных волн (ПДВ) $f = 1.51 \div 2.73$ кГц и скоростью детонации $D = 1.13 \div 1.42$ км/с.

В труднодетонируемых газовых ТВС $\text{CH}_4 + 8\text{H}_2 +$ воздух ($m_H = 1/2$) и $\text{CH}_4 + 4\text{H}_2 +$ воздух ($m_H = 1/3$) в диапазоне удельных расходов воздуха через кольцевую щель $g_\delta = 470 \div 4050$ кг/(с·м²) и коэффициента избытка горючего $\phi = 0.8 - 1.5$ впервые были осуществлены одноволновые и двухволновые режимы НСД с частотой вращения ПДВ $f = 0.56 - 1.66$ кГц и скоростью детонации $D = 0.76 \div 1.3$ км/с. Здесь m_H – массовая доля водорода в составе двухкомпонентного горючего метан/водород. Определены нижние пределы существования НСД по удельному расходу воздуха: ($m_H = 1/2 - g_{\delta\min} \approx 310$ кг/(с·м²) при $\phi = 0.91$; $m_H = 1/3 - g_{\delta\min} \approx 570$ кг/(с·м²) при $\phi = 0.97$).

В гетерогенной ТВС авиационный керосин/ H_2 – воздух в диапазоне удельных расходов смеси $g_\Sigma = 230 \div 565$ кг/(с·м²) с варьируемой массовой долей водорода в двухфазном горючем $m_H = G_H/(G_F + G_H)$ в диапазоне $m_H = 8.4 \div 42$ % реализованы режимы НСД с числом ПДВ от пяти до одной. Жидкий керосин (ТС - 1) барботировался водородом и подавался в камеру сгорания. При $g_\Sigma = 527$ кг/(с·м²), $\phi_f = 0.32$, $\phi_H = 0.51$, $m_H = 42$ % был реализован (см. рис. 1) пятиволновой режим НСД с частотой ПДВ $f = 4.86$ кГц и скоростью детонации $D = 1.48$ км/с при высоте фронта ПДВ $h \approx 60 \div 70$ мм.



Рис. 1. Фрагмент фоторегистрограммы ПДВ в двухфазной смеси керосин/водород – воздух ($n = 5$).

При $g_\Sigma = 557$ кг/(с·м²), $\phi_f = 0.68$, $\phi_H = 0.41$, $m_H = 21$ % реализован трехволновой режим НСД с $f = 2.93$ кГц, и $D = 1.49$ км/с и $h \approx 100 \div 120$ мм. При $g_\Sigma = 362$ кг/(с·м²), $\phi_f = 1.29$, $\phi_H = 0.27$, $m_H = 8.4$ % реализован одноволновой режим НСД с $f = 1.02$ кГц, $D = 1.56$ км/с. Показано, что количество ПДВ и частота их вращения уменьшаются при уменьшении массовой доли водорода в двухфазном горючем и удельного расхода воздуха, а высота фронта ПДВ растёт.

Итак, в проточной кольцевой цилиндрической камере ДК-500 реализованы и исследованы многоволновые режимы НСД смеси синтез-газ – воздух, труднодетонируемой смеси метан-водород – воздух и труднодетонируемой гетерогенной смеси авиационный керосин/ H_2 – воздух. Определены пределы существования НСД по удельному расходу ТВС (минимальные значения). Структура ПДВ в трех исследованных труднодетонируемых ТВС близка к структуре ПДВ в ТВС ацетилен – воздух и водород – воздух [3]. Установлено, что все исследованные до настоящего времени газовые ТВС, в том числе самая труднодетонируемая ТВС метан-воздух при добавке водорода можно сжигать в проточной кольцевой цилиндрической камере ДК-500 в режиме НСД.

В гетерогенной смеси жидкого керосина с воздухом, представляющей практический интерес, при добавке газообразного водорода впервые реализованы многоволновые режимы НСД. Отметим, что без добавки водорода режим НСД в ДК-500 не был получен. Применение барботирования жидкого керосина газообразным водородом позволило уменьшить массовую долю водорода в двухфазном горючем от 42 % до 8.4 %. Структура ПДВ в исследованной гетерогенной топливно-воздушной смеси подобна наблюдавшимся в смеси синтез-газ-воздух. Полученные результаты открывают возможность систематических и целенаправленных исследований специфики и особенностей режимов НСД в гетерогенных ТВС применительно к кольцевым камерам сгорания ВРД.

Список литературы:

1. Войцеховский Б.В. Стационарная детонация // Докл. АН СССР. 1959. Т. 129, № 6. С. 1254-1256.
2. Быковский Ф.А., Ждан С.А. Непрерывная спиновая детонация. Новосибирск. Изд-во СО РАН. 2013. 423 с.
3. Быковский Ф.А., Ждан С.А., Ведерников Е.Ф. Непрерывная спиновая детонация топливно-воздушных смесей. // Физика горения и взрыва. 2006. Т. 42, № 4. С. 107-115.

Работа поддержана РФФИ (грант № 16-01-102а).

В.А. Жигарев¹, А.В. Минаков^{1,2}, А.Л. Неверов¹, М.И. Пряжников^{1,2}, Д.В. Гузей^{1,2}¹ ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» г. Красноярск² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: Zhigarev.vladimir@yandex.ru

Приоритетным направлением в вопросах бурения нефтяных и газовых скважин является разработка методов и программ по снижению перепада давления в стволе скважины при прокачивании по ней бурового раствора. Для эффективного и надежного управления процессом бурения критически важно иметь информацию о гидравлическом сопротивлении и структуре течения в скважине непосредственно в процессе бурения. Несмотря на огромное количество теоретических, расчетных и экспериментальных исследований по течениям бурового раствора в скважинах, имеющих на сегодняшний день, в полной мере невозможно дать необходимую информацию о всех параметрах течения в скважине в требуемом широком диапазоне параметров буровой колонны и реологических свойств бурового раствора.

В данной работе для решения этой задачи использовались методы вычислительной гидродинамики (CFD), основанные на численном решении пространственных и нестационарных уравнений Навье-Стокса применительно к сложной реологии реальных буровых растворов [1]. В качестве реологических законов течения в скважине рассмотрены все основные модели (степенная модель, бингамовская модель, модель Herschel-Bulkley), описывающие в широком диапазоне параметров поведение большинства буровых растворов.

Для тестирования расчетного алгоритма создан экспериментальный стенд (рис.1.). Стенд представлял собой замкнутый контур. В рабочий участок подавалась жидкость из бака (1) при помощи центробежного насоса (2). Расход жидкости регулировался вентилями (3-4) и контролировался при помощи расходомера (5). Далее жидкость попадала в рабочий участок – кольцевой канал (6), длина которой составляла 0,5 м. Измерения перепада давления на участке трубы проводились при помощи дифференциального манометра (7).

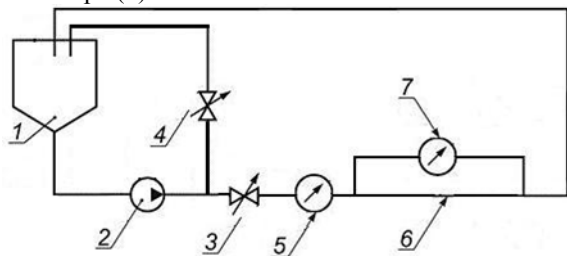


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Проведен ряд экспериментов, в котором варьировался расход и измерялась зависимость перепада давления от расхода в широком диапазоне от 7,5 до 28 л/мин. Для верификации экспериментального стенда в начале были проведены опыты на чистой воде. Полученные экспериментальные результаты по перепаду давления с высокой точностью совпали с известными аналитическими решениями. Проведена серия экспериментов на модельных и реальных буровых растворах с известными реологическими показателями. Получены зависимости перепада давления от реологических свойств и расхода модельного раствора. Эти данные использовались для тестирования численной методики моделирования течения неньютоновской жидкости в кольцевых каналах. Получено хорошее согласие расчета и эксперимента.

Была проведена адаптация численной методики на расчете потерь давления в реальной скважине [2]. Для проведения расчетных исследований создана полная гидравлическая модель скважины, учитывающая реальную компоновку бурильной и колонковых труб комплекса ССК-NQ, расход жидкости варьировали в диапазоне от 40 до 70 л/мин, частота вращения бурильной колонны 300-600 об/мин. Выполнен анализ течения в отдельных элементах скважины. Установлено, что основные потери давления возникают при движении бурового раствора именно в кольцевом пространстве. Результаты расчетов сопоставлены с экспериментальными замерами, полученными на скважине в процессе бурения. Показано, что расчетные данные потерь давления хорошо согласуются с зафиксированными потерями давления при бурении скважины во всем диапазоне изменения параметров.

1. Гаврилов А.А., Минаков А.В., Дектерев А.А., Рудяк В.Я. Численный алгоритм для моделирования установившихся ламинарных течений неньютоновских жидкостей в кольцевом зазоре с эксцентриситетом. Вычислительные технологии. 2012. Т. 17. № 1. С. 44-56.
2. Неверов А.Л., Минаков А.В., Жигарев В.А., Каратаев Д.Д. Повышение эффективности сооружения глубоких скважин комплексами со съемными керноприемниками. ФТПРПИ №6, 2016. С. 75-85

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности» в рамках научного проекта № 16-41-243034.

**КОНТРОЛИРУЕМОЕ ОРОШЕНИЕ СТРУКТУРИРОВАННОЙ НАСАДКИ КАК СПОСОБ
ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗДЕЛЕНИЯ СМЕСИ ЖИДКОСТИ В ДИСТИЛЛЯЦИОННОЙ
КОЛОННЕ****Павленко А.Н., Жуков В.Е. Печеркин Н.И., Li X., Sui H.**

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

E-mail: zhukov@itp.nsc.ru

Дистилляционные колонны широко используются в нефтеперерабатывающей, химической, пищевой промышленности для разделения смесей различных жидкостей. Основным требованием для эффективной работы дистилляционной колонны является достижение равномерностей распределения по ее сечению пленки жидкости, стекающей по поверхности насадки, и противоточного потока пара. Для достижения этой цели разработаны насадки, состоящие из листов металла с нанесенной структурой разного масштаба, а также высокопроницаемые пористые насадки [1]. Применение современных структурированных насадок позволяет существенно более равномерно распределить пленку жидкости по поверхности насадки, но до конца не решает проблему равномерного распределения потоков по всей насадке. Наличие по высоте насадки отрицательной стратификации пара, обусловленной различной плотностью компонент паровой смеси и более высокой температурой в нижней части колонны, приводит к формированию крупномасштабной неравномерности распределения температуры и состава смеси по сечению колонны даже в условиях равномерного орошения насадки жидкостью. В наших экспериментах была реализована идея компенсаторного воздействия со стороны распределителя жидкости на крупномасштабную неравномерность состава смеси по сечению колонны.

Эксперименты проводились на крупномасштабном исследовательском стенде «Большая Фреоновая Колонна», детальное описание которого приведено в [2]. В дистилляционной колонне диаметром 0.9 м была установлена структурированная насадка Mellapak 350Y. Опыты проводились на 19-ти и 10-ти слоях насадки при общей высоте насадки 4 и 2.1 м, соответственно. В качестве рабочей смеси использовалась смесь фреонов R-21 и R-114, которая по своим характеристикам подбиралась для моделирования разделения криогенных смесей. Для орошения насадки использовался специально разработанный авторами распределитель жидкости. Распределитель имел 126 электромагнитных клапанов, перекрывающих отверстия диаметром 5 мм. Каждый клапан имел независимое управление от ПК посредством специально разработанного программного обеспечения, позволяющего реализовать как режим ручного управления отдельно взятым клапаном, либо произвольной группой клапанов, так и программное переключение клапанов по любому заранее определенному алгоритму с временной дискретизацией 1 с. Реакцию колонны на воздействие со стороны распределителя жидкости наблюдали в режиме реального времени по показаниям 3-х групп термометров, установленных в 3-х различных по высоте насадки сечениях колонны. Каждая группа состояла из 16-ти термометров, рав-

номерно распределенных по сечению насадки. Их показания отображались на мониторе компьютера в виде топограмм. Группы термометров были установлены в нижнем (2 слоя от низа насадки), среднем и верхнем (2 слоя от верха насадки) сечениях насадки. Выводимая на монитор информация позволяла оценить как структуру крупномасштабной неравномерности температуры, так и величину этой неравномерности.

Эксперименты проводились при фиксированном количестве точек орошения распределителя жидкости. Начальная конфигурация точек орошения соответствовала равномерному орошению насадки. После выхода колонны на квазистационарный режим работы и регистрации структуры и степени крупномасштабной неравномерности распределения температуры по сечению колонны делалась минимальная коррекция конфигурации точек орошения распределителя жидкости. Коррекция осуществлялась путем открытия одного отверстия в распределителе жидкости в области проекции крупномасштабной зоны максимальных температур при одновременном закрытии одного отверстия в области проекции зоны минимальных температур. В результате изменялись структура и степень крупномасштабной неравномерности распределения температуры по сечению колонны и, как следствие, эффективность разделения смеси. Посредством двух-трех вышеописанных итераций достигалась минимальная степень неравномерности распределения температуры в сечениях колонны и, как следствие, наилучшая эффективность разделения смеси.

Проведенные эксперименты показали, что минимальная коррекция структуры точек орошения распределителя жидкости способна существенно повлиять на структуру распределения параметров потоков по сечению и высоте массообменной поверхности и увеличить эффективность разделения колонны в пределах 20%.

1. Pavlenko A.N., Zeng J., Pecherkin N.I., Zhukov V.E., Volodin O.A. Separation efficiency and pressure drop of SiC ceramic and Mellapak structured packings // Journal of Engineering Thermophysics. 2016. V. 25, No. 1, P. 1-14.
2. Pavlenko A.N., Zhukov V.E., Pecherkin N.I. et al. Investigation of flow parameters and efficiency of mixture separation on a structured packing // AIChE J. 2014. V. 60, Is. 2. P. 690-705. DOI: 10.1002/aic.14298.

Исследование выполнено в ИТ СО РАН за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-49-00010)

КАВИТАЦИЯ В ЩЕЛЕВОМ ЗАЗОРЕ: ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И PIV ИЗМЕРЕНИЯ

Запругаев И.И.¹, Тимошевский М.В.¹, Первунин К.С.^{1,2}

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

² Новосибирский национальный исследовательский государственный университет (НГУ), Новосибирск
E-mail: ivanzapryagaev@gmail.com

Щелевая кавитация, возникающая при протекании жидкости через узкие зазоры под большим напором, является одной из наиболее распространенных и агрессивных форм кавитации в современных гидравлических машинах и технологических устройствах. Наиболее разрушительное ее воздействие на рабочие элементы гидротехнического оборудования наблюдается в местах выхода потока, протекающего через щелевой канал, на сторону меньшего давления. В условиях, когда имеют место малые пространственные масштабы (от долей миллиметра до нескольких миллиметров), высокие скорости сдвига (иногда за счет движения стенок зазора) и сильная завихренность в области перетекания потока на сторону с меньшим давлением, претерпевает существенные изменения сам процесс образования кавитационных полостей. Это связано с изменением условий парообразования, ограниченной вероятностью нахождения ядер кавитации в зазоре и возможностью продолжительного существования кавитационных полостей в области пониженного давления присоединенных вихрей. Таким образом, кавитация в малых зазорах имеет множество отличительных черт, делающих ее особым видом кавитации. Экспериментальное моделирование таких течений существенно осложнено техническими сложностями, связанными с созданием узких зазоров заданного размера при большой относительной длине. Помимо этого, требуется создание условий для проведения оптических измерений, что тоже оказывается не всегда возможным. Таким образом, несмотря на широкую распространенность явления щелевой кавитации, оно до сих пор остается плохо изученным и недостаточно подробно описанным в научной литературе.

В качестве объекта исследования была выбрана уменьшенная модель направляющей лопатки (НЛ) радиально-осевой гидротурбины с двусторонней осью и щелевым зазором, образованным торцевой поверхностью гидрокрыла и стенкой рабочего канала кавитационной гидродинамической трубы ИТ СО РАН. Данная работа направлена на изучение условий, приводящих к зарождению щелевой кавитации, изменению пространственной структуры и динамики парогазовых полостей в щели во взаимосвязи с динамикой основной каверны со стороны разряжения гидрокрыла, и исследованию гидродинамической структуры течения в зазоре в зависимости от толщины щелевого канала (от 0,4 до 1,5 мм), угла атаки гидрокрыла (от 0 до 9°) и режима кавитационного обтекания по числу кавитации (от 0,8 до 2,6). С этой целью в экспериментах были использованы современные оптические методы диагностики двухфазных течений, такие как высокоскоростная визуализация и методы цифровой трассерной визуализации (PIV) и трекинга частиц (PTV).

В результате проведенной визуализации и измерений скорости течения в щелевом зазоре были зафиксированы ключевые особенности начала процес-

са парообразования и развития кавитационного течения в щелевом зазоре. Так, было обнаружено, что при малых углах атаки кавитация зарождается в щелевом зазоре сразу за передней кромкой со стороны давления в виде единой пленки малого размера. При увеличении угла атаки до 9° размер кавитационной полости в щели увеличивается и приобретает ярко выраженную волновую структуру, которая со временем изменяется. Вместе с тем, наблюдается образование парогазовой пленки со стороны задней кромки сразу за осью гидрокрыла, которая, однако, неустойчива и время от времени исчезает. На стационарных режимах жидкость непрерывно перетекает через щелевой зазор со стороны давления на сторону разряжения. На нестационарных же режимах течение в щели за осью периодически меняет свое направление на противоположное в зависимости от фазы развития основной каверны со стороны разряжения гидрокрыла. При увеличении щелевого зазора на больших углах атаки происходит изменение структуры парогазовой полости образующейся за передней кромкой гидрокрыла. Каверна теряет свою волнистую структуру и переходит в классическую пленочную каверну (рис. 1). Проведенные в щелевом зазоре измерения скорости показали, что за передней кромкой гидрокрыла средняя скорость становится в полтора раза больше среднерасходной скорости основного потока U_0 , но по мере приближения к оси поток замедляется до скорости U_0 (по модулю) и практически полностью теряет свою продольную компоненту. За осью находится застойная зона с развитым возвратным течением, которая по мере приближения к задней кромке гидрокрыла исчезает, а поперечная компонента скорости уменьшается почти до нуля, и поток становится почти сонаправленным основному течению. Таким образом, впервые было проведено прямое наблюдение щелевой кавитации, а также измерены распределения скорости в щелевом зазоре, демонстрирующие всю сложность исследуемого течения.

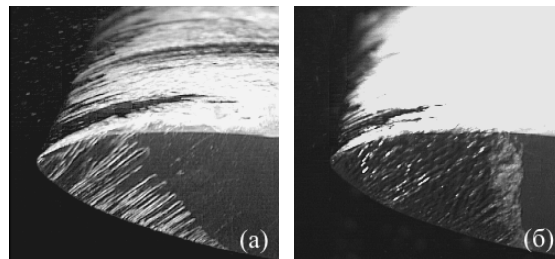


Рис. 1. Мгновенные фотографии кавитационных каверн, возникающих со стороны разряжения гидрокрыла и в щелевом зазоре толщиной (а) 0,4 мм и (б) 0,8 мм между торцевой поверхностью НЛ и прозрачной стенкой рабочего канала при $\alpha = 9^\circ$ и $\sigma = 1,65$.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-19-00138 под руководством Куйбина П.А. в ИТ СО РАН).

ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ПОЛЕЙ СКОРОСТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ОБРАБОТКИ PIV-ИЗОБРАЖЕНИЙ

Зарипов Д.И., Renfu Li

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China

E-mail: zaripov.d.i@mail.ru

За последние три десятилетия метод PIV (Particle Image Velocimetry) стал надежным инструментом для измерения кинематической структуры течения жидкости и газа [1]. Важнейшей задачей при разработке различных алгоритмов метода PIV является обеспечение высокой точности измерения перемещений наблюдаемых в потоке частиц. Наряду с этим, задача уменьшения вычислительных затрат имеет не менее важное значение.

Вычислительная сложность метода Fast Fourier Transform Cross-Correlation (FFT-CC) для двумерных изображений имеет порядок $O(N^2 \log_2 N^2)$, где N – размер расчетной области. Это делает его более предпочтительным с точки зрения производительности вычислений по сравнению с методом Direct Cross-Correlation (DCC), имеющим сложность $O(N^4)$. Недостатком метода FFT-CC является невозможность его использования совместно с методом «скользящего» окна, при котором расчетная область на последующем кадре смещается в пределах области поиска. Другими словами, координаты центров расчетной области на двух последовательных кадрах должны быть зафиксированы. Поэтому метод FFT-CC обычно используется при расчете полей скорости на первом шаге итеративных подходов, когда первоначальное поле скорости неизвестно и полагается равным нулю.

С другой стороны, использование FFT-CC накладывает ограничения на размер расчетной области при исследовании сдвиговых течений: типичный размер расчетной области $N \times N = 32 \times 32$ пикс². Увеличение расчетной области до 64×64 пикс² приводит к значительным ошибкам определения перемещения частиц в течениях с большими градиентами скорости [2]. Согласно общепринятому правилу выбора размера расчетной области [3], максимальное смещение изображений частиц между двумя последовательными кадрами должно быть меньше четверти размера расчетной области, т.е. меньше 8 и 16 пикс для изображений с размерами 32×32 и 64×64 пикс², соответственно. Это является существенным ограничением современных PIV методов, использующих FFT-CC в качестве метода расчета поля скорости на начальной итерации, когда поле скорости априори неизвестно.

В настоящей работе предложен алгоритм 1D-DCC определения полей скорости на начальной итерации, имеющий вычислительную сложность $O(Nnm)$, где n и m – размеры области поиска. 1D-DCC основан на алгоритме Parallel Projection Correlation, предложенном впервые в работе [4]. Разработанный алгоритм имеет вычислительное преимущество перед методом FFT-CC при надлежащем выборе области поиска и позволяет использовать расчетные области малого размера на начальной итерации, не ограничивая при этом максимальное измеряемое значение смещения

изображений частиц. Последнее обеспечивается использованием метода «скользящего» окна, позволяющего, теоретически, определять любую величину измеряемой скорости.

На основе анализа синтезированных изображений, моделирующих плоскопараллельное и сдвиговое течения, проводится сравнительная оценка точности алгоритма 1D-DCC с использованием расчетной области с размерами 16×16 и 32×32 пикс². Анализ случайной (рис. 1) и систематической ошибок определения компонент скорости показал высокие прогнозные свойства алгоритма 1D-DCC. В заключительной части доклада продемонстрировано применение 1D-DCC совместно с ультрасовременным итерационным методом [5], основанным на дробном смещении деформируемой расчетной области и обеспечивающим высокую точность определения векторов скорости на последующих итерациях.

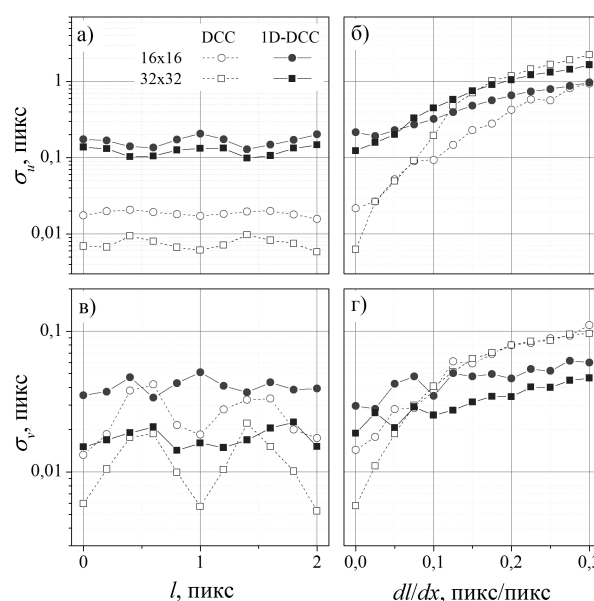


Рис. 1. Случайная ошибка определения продольной (а, б) и поперечной (в, г) компонент смещения изображений частиц при плоскопараллельном (а, в) и сдвиговом (б, г) течениях.

1. Kähler C.J., Asarita T., Vlachos P.P., et al Main results of the 4th International PIV Challenge // Experiments in Fluids. 2016. V. 57:97. P. 1-71.
2. Raffel M., Willert C., Kompenhans J. Particle Image Velocimetry. A Practical Guide // Springer, 1998.
3. Keane RD, Adrian RJ Theory of cross-correlation analysis of PIV images // Applied Scientific Research. 1992. V. 49. P. 191-215.
4. Bilsky A.V., Dulin V.M., Lozhkin V.A., et al Two-dimensional Correlation Algorithms for Tomographic PIV // 9th International Symposium on Particle Image Velocimetry – PIV11. Kobe, Japan, 2011. P. 1-4.
5. Scarano F., Riethmuller M.L. Advances in iterative multigrid PIV image processing // Experiments in Fluids. 2000. V.29. P. S51-S60.

Исследовано влияние мелкомасштабных возмущений концентрации горючей компоненты водородно-кислородной смеси на распространение пламени в полуоткрытом канале. Как при теоретических, так и при экспериментальных исследованиях большинство фундаментальных результатов физики горения газов было получено для полностью перемешанных горючих газовых смесей. Однако процессы горения на практике редко протекают в течение всего периода в условиях хорошо перемешанных смесей. Обычно смесь достигает полного перемешивания своих компонент, исходя из начально неперемешанного состояния среды, когда отдельные компоненты разделены в объёме друг от друга. Возникающие в процессе дальнейшей релаксации смеси к однородному состоянию промежуточные пространственные распределения горючего и окислителя имеют различные масштабы и структуры неоднородностей [1]. При этом, в случае интенсивного конвективного перемешивания или впрыска, компоненты в смеси претерпевают эволюцию от стадии быстрого турбулентного перемешивания отдельных компонент до относительно медленной стадии диффузионной релаксации, когда крупные разнокомпонентные структуры уже диссипировали, но смесь ещё остаётся локально неоднородной, и её релаксация к полностью однородному состоянию может продолжаться от секунд до десятых или сотых долей секунды в зависимости от рассматриваемого процесса. Именно на этом интервале времени, когда на больших пространственных масштабах смесь уже можно считать практически однородной, во многих технических системах происходят основные процессы - воспламенение и сгорание топлива. Так в камере сгорания двигателя искровой поджиг происходит всего в нескольких градусах поворота коленчатого вала от мёртвой точки, когда в смеси остаются только возмущения концентрации миллиметровых масштабов. Горение на этой стадии распространяется во всём объёме, подобно горению в перемешанных средах, испытывая, однако, возмущения от неоднородного распределения концентрации горючего. Такую ситуацию будем условно называть распространением горения в плохо перемешанной смеси.

Анализ волн горения в плохо перемешанных смесях выполнен методами математического моделирования. Расчёты проводились в двухмерной геометрии на основе математической модели газодинамики горения с учётом сжимаемости, теплопроводности, вязкости газа, диффузии и энерговыделения за счёт химических реакций. Кинетика горения водородно-кислородной смеси описывалась редуцированной схемой из девяти реакций. Для численного решения использовался эйлерово-лагранжев метод, обеспечи-

вающий устойчивое решение широкого класса нестационарных задач воспламенения, горения и детонации. Постановка задачи повторяла представленную в работе [2], где волна горения распространялась из зоны поджига вблизи закрытого торца канала. Пространственные размеры областей с отклонением концентраций компонент от средних значений отличались для разных вариантов, а их расположение задавалось случайным образом. Расчёты проводились в предположении гладких стенок канала. В такой постановке основным источником ускорения фронта пламени в полностью перемешанной смеси является неустойчивость Дарье-Ландау (Д-Л) с критической длиной волны λ_c , которая, как показали расчёты, является также критическим параметром и для процесса ускорения пламени в плохо перемешанной смеси. При этом, хотя во всём интервале пространственных масштабов возмущений концентрации δ ($0.1\text{ мм} < \delta < 2.0\text{ мм}$) скорость распространения пламени в плохо перемешанных смесях превышает скорость в полностью перемешанной, процесс эволюции фронта пламени качественно различается при $\delta < \lambda_c$ и $\delta > \lambda_c$. В первом случае возмущения концентрации мало меняют развитие неустойчивости Д-Л, причём основное изменение здесь проявляется в возникновении коротковолновых мод на фронте пламени, которые, как известно, не являются ведущими в неустойчивости Д-Л. В тоже время при $\delta > \lambda_c$ наблюдается рост и взаимодействие крупных гармоник, что характерно для поздних сугубо нелинейных стадий развития неустойчивости Д-Л. Скорость распространения фронта пламени резко возрастает, и, например, при $\delta = 0.5\text{ мм}$ уже за время меньшее 1 мс в среде наблюдается переход в детонацию. При ещё больших масштабах возмущений поле концентраций в смеси приобретает турбулентный характер, что отражается и на динамике развития горения, которое становится аналогичным горению в турбулентной среде, хотя движение среды перед фронтом пламени не является турбулентным

1. Cisse P., Karim G. A. The rapid formation and dispersion of flammable zones within cylindrical vertical enclosures following the release of a fixed mass of hydrogen and other gaseous fuels into air // I.J. of Hydrogen Energy. 2007. V.32. P. 630 - 636.
2. Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Либерман М.А., Фортков В.Е. Механизм ускорения пламени и переход в детонацию водородно-кислородной смеси в канале // ДАН. 2010. М. 434, №6. С. 756-759.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (№ 14-50-00124).

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛООБМЕННЫХ ПАНЕЛЕЙ ДЛЯ СИСТЕМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ КОСМИЧЕСКИХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

Ильмов Д.Н.¹¹ ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», МоскваE-mail: ilmovdn@mail.ru

В настоящее время для расширения возможностей космических аппаратов считается перспективным их оснащение ядерными энергетическими установками с мощностью 1 МВт и более. Особенности работы теплообменников таких установок - высокие температуры (более 1000 К) и большой перепад давления (десятки атмосфер) между трактами теплоносителей при крайне высоких массогабаритных требованиях, что практически исключает применение известных конструкций. В ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша» была разработана новая конструкция на базе штампованных пластин. На рис. 1 изображен схематичный вид пакета пластин и панель для создания поперечноточных экспериментальных моделей теплообменников.

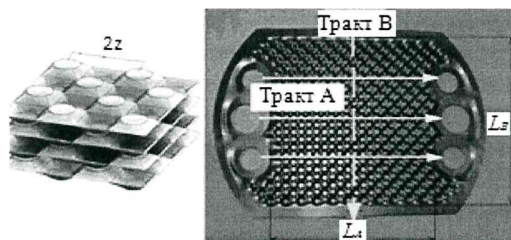


Рис. 1. Слева - схематичный вид пакета пластин, справа - пластина для создания моделей теплообменников.

Поскольку структура поверхности пластин является оригинальной, актуально исследование ее тепловых и гидравлических характеристик. Для этих целей проводились испытания «воздух-воздух» на теплообменниках с количеством пластин от 2-х до 40-ка.

Важной задачей также является разработка математического аппарата для моделирования теплообменных поверхностей данного класса. Можно предложить два подхода: доскональное воспроизведение геометрии (3D сканирование), что требует больших вычислительных затрат, или отыскание упрощенных аналогов. В качестве эквивалента здесь предлагается столбчатая поверхность с аналогичным по площади и гидравлическому диаметру «сжатым» сечением (рис.2). Рис. 3 иллюстрирует поля скорости и температуры, получаемые с помощью упрощенной модели. На рис. 4-5 результаты моделирования сопоставляются с результатами испытаний.

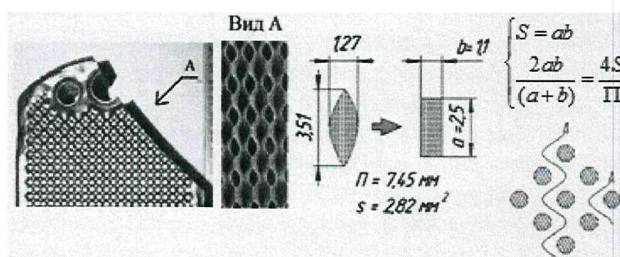


Рис. 2. Построение эквивалентной расчетной области по «сжатым» сечениям.

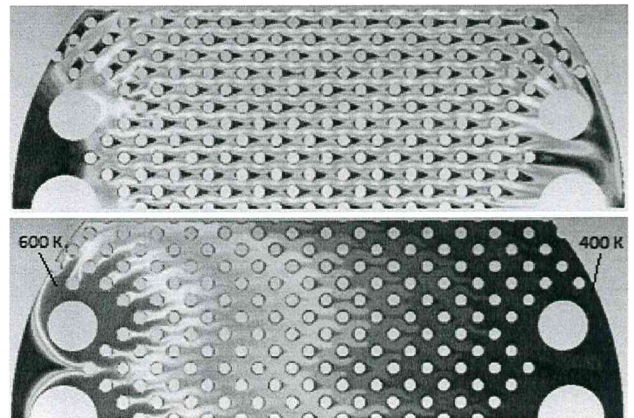


Рис. 3. Поле скорости и температуры по результатам моделирования.

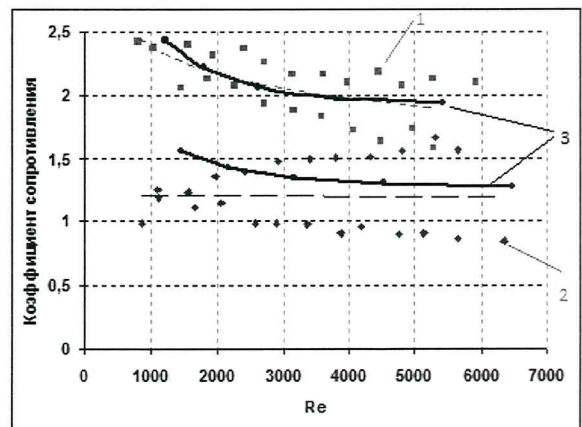


Рис. 4. Зависимость коэффициента сопротивления от безразмерного расхода - числа Рейнольдса (Re) для 20-ти панельного теплообменника: 1 - тракт А; 2 - тракт В; 3 - моделирование для трактов А и В.

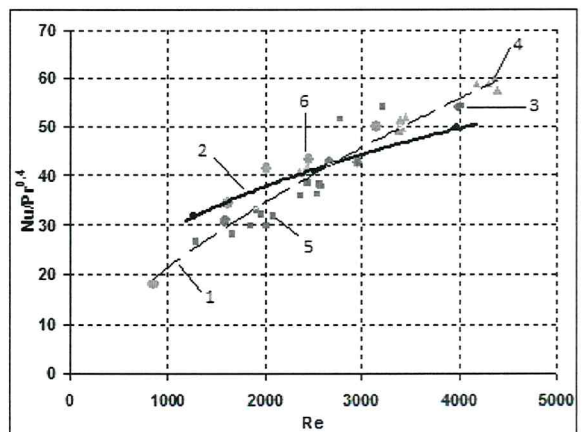
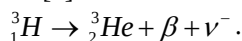


Рис. 5. Зависимость безразмерного коэффициента теплоотдачи от числа Рейнольдса: 1 - аппроксимация экспериментов; 2 - моделирование; 3-6 - испытания 2-х, 4-х, 20-ти и 40-ка панельных теплообменников.

Технология реакторов на быстрых нейтронах является одной из наиболее перспективных для развития реакторов с жидкометаллическим теплоносителем. Одной из наиболее актуальных проблем при развитии данной технологии является обоснование радиационной безопасности реакторных установок. Для решения данной задачи необходимо моделирование всех основных физических процессов, определяющих выход и распространение радионуклидов в технологических средах реакторной установки в режиме нормальной эксплуатации. Это, в свою очередь, определяет необходимость разработки соответствующих программных кодов для моделирования определяющих физико-химических процессов.

Тритий является радиоактивным изотопом водорода, его радиоактивный распад происходит по каналу с образованием гелия, бета-частицы и антинейтрино [1].



Основным источником трития является активная зона, интенсивность его образования зависит от мощности реактора. Выход трития из активной зоны реактора, а также его перенос по контурам и сток в окружающую среду определяется большой проникающей способностью трития через конструкционные материалы. Можно сказать, что выход трития за пределы станции с различной интенсивностью происходит всегда, даже при нормальном режиме работы реактора. Ключевыми технологическими элементами РУ в этом процессе являются стенки каналов промежуточных теплообменников и парогенераторов и холодные ловушки.

Данная работа посвящена моделированию основных процессов динамики трития в реакторных установках: переносу примеси вместе с теплоносителем, проницаемости через стенки труб, протечкам через неплотности трубопроводов, стоку и накоплению трития в холодных ловушках. Для расчетов использовался код HYDRA-IBRAE/LM [2], разрабатываемый в ИБРАЭ РАН. Код HYDRA-IBRAE/LM является системным одномерным теплогидравлическим расчётным кодом и предназначен для анализа нестационарных теплогидравлических процессов в контурах ядерных энергетических установок с водородными реакторами под давлением и реакторных установках с жидкометаллическими теплоносителями в нормальных, переходных и аварийных режимах. Для моделирования динамики трития был разработан специальный модуль, реализующий основные процессы переноса трития. Основной отличительной особенностью данного модуля, является, по возможности, минимальное использование консервативно задаваемых параметров модели. Например, коэффициентов проницаемости трития через стенки трубопроводов. Это условие особенно важно для опреде-

ления параметров, которые по физике процессов зависят от динамического состояния элементов реакторной установки – температуры стен теплообменников и парогенераторов, скорости потока теплоносителя, толщины и типа стали стен, коэффициентов диффузии, проницаемости и других. Как следствие, это означает вычисление, по возможности, всех коэффициентов непосредственно в соответствующих блоках программного модуля с учетом их изменения со временем и в зависимости от параметров конкретной установки. Модуль является отчуждаемым, т.е. позволяет пользователю проводить независимые от разработчиков расчеты с другими параметрами модели, другой нодализационной схемой или для других РУ. Коэффициенты проницаемости трития через стенки каналов РУ вычисляются в зависимости от состояния теплоносителя по обе стороны от стенки и геометрии стенки, включая ее поверхность, толщину и свойства материала. Перечисленные особенности модуля позволяют проводить моделирование широкого спектра явлений, а также достаточно легко внедрять модуль для использования в других программных средствах.

Проведенный анализ открытых литературных источников показал недостаток экспериментальных данных, необходимых для верификации модуля переноса трития в контурах реакторных установок на быстрых нейтронах. В основном это связано с отсутствием современных лабораторных исследований по этой теме и большой неопределенностью условий и параметров измерений, полученных на действующих реакторных установках на быстрых нейтронах. Вследствие нехватки экспериментальных данных, особое внимание уделялось аналитическим тестам и кросс-верификационным расчетам с другими кодами (TRAC [3] и THYTAN [4]). В работе приведено описание моделей, используемых в коде для расчета, а также представлены результаты расчетов.

Проведенные аналитические тесты, сравнительные расчеты и моделирование эксперимента демонстрируют хорошую точность результатов расчетов, что позволяет говорить о корректности использования данных моделей и правильной их реализации в коде HYDRA-IBRAE/LM.

1. Беловодский Л.Ф. и др. Тритий. М.: Энергоатомиздат, 1985
2. Отчёт о верификации и обосновании программного средства HYDRA-IBRAE/LM/V1, Москва, 2016.
3. Oh C.H., Kim E.S. Kim. Development and Verification of Tritium Analyses Code for a Very High Temperature Reactor. [Prepared for the U.S. Department of Energy Office of Nuclear Energy Under DOE Idaho Operations Office Contract DE-AC07-05ID14517] September. INL/EXT-09-16743, 2009.
4. Ohashi H., Sherman S.R. Tritium movement and accumulation in the NGNP system interface and hydrogen plant, INL/EXT-07-12647, 2007.

Илюшин Б.Б.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университетE-mail: Ilyushin@itp.nsc.ru

Представлены результаты разработки и коммерциализации химических источников тока со щелочным электролитом. Работа выполнялась совместно с компаниями More Energy (Израиль) и GenCell (Израиль). Показаны результаты моделирования теплофизических процессов, включая оптимизацию конструкции по тепловым и водным балансам. Предложена схема реализации конструкции, обеспечивающая энергоэффективный способ сжигания топлива (боргидрида, водорода, азото-водородной смеси) в рабочем режиме и минимальные потери в режиме без нагрузки [1]. Решены ряд вопросов контроля качества элементов конструкции в процессе их изготовления при промышленном производстве. Разработаны и внедрены программные комплексы для управления генераторами, а также ситуационный центр контроля и управления поставленными заказчику генераторами.

Представлены результаты исследований по созданию портативного воздушно-алюминиевого химического источника тока (ВА ХИТ) со щелочным элек-

тролитом без дополнительных контуров обслуживания [2]. Показана возможность создания воздушных катодов на основе металл-углеродного композита, полученного по плазменно-дуговому методу. Исследованы режимные особенности работы портативных ВА ХИТ. Установлено, что пассивация алюминиевого анода при выпадении из раствора гидроокиси алюминия существенно ограничивает их удельную емкость. Показана возможность преодоления пассивации анода и значительного увеличения удельной емкости ВА ХИТ со щелочным электролитом путем модификации анодного сплава. Применение не пассивирующихся анодных сплавов позволяет создавать воздушно-алюминиевые электрохимические генераторы тока с непрерывной подачей алюминия.

[1] G.Finkelshtain et al. Method and apparatus for preventing fuel decomposition in a direct liquid fuel cell//US Patent N 20060057435 A1.

[2] D. Ph. Sikovsky, S. M. Kharlamov, V. I. Palymsky, K. G. Dobroselsky, M. G. Vlasenko, and B. B. Ilyushin// Heat Transfer and Thermohydrodynamic Fluctuations in Aluminum–Air Fuel Cell// Journal of Engineering Thermophysics, 2015, Vol. 24, No. 4, pp. 386–397

РАЗРАБОТКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА КОМПОЗИТНЫХ СЕТКАХ, ВЕРИФИКАЦИЯ МОДИФИЦИРОВАННОЙ С УЧЕТОМ ПОПРАВКИ НА КРИВИЗНУ ЛИНИЙ ТОКА В РАМКАХ ПОДХОДА РОДИ-ЛЕШЦИНЕРА-ИСАЕВА SST-МОДЕЛИ 2003 ГОДА НА ТЕСТОВЫХ ЗАДАЧАХ ОТРЫВНОГО ОБТЕКАНИЯ ТЕЛ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В УЗКИХ КАНАЛАХ С ПОМОЩЬЮ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВИХРЕГЕНЕРАТОРОВ

Исаев С.А.^{1,2}, Баранов П.А.¹, Щелчков А.В.²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, Санкт-Петербург

² Казанский национальный исследовательский технический университет – КАИ, Казань

E-mail: isaev@yandex.ru

Разработка пакетных технологий для численного моделирования гидродинамических и теплофизических процессов стимулируется развитием элементной базы компьютеров и совершенствованием многопроцессорных платформ. Также прогрессирует системное программирование. Многоблочные вычислительные технологии, реализованные в пакете VP2/3 [1], эволюционировали в направлении композитных сеток, в которых области пересечения структурированных разномасштабных сеток заполняются неструктурированными вставками. В комплексном численно-экспериментальном исследовании [2] оценивается точность прогнозов на композитных сетках, сравниваются результаты расчетов на различных пакетах (VP2/3, Sigma-Flow, Fluent, CFX, StarCCM+, OpenFOAM) и при использовании моделей турбулентности различного уровня (стандартные и модифицированные с учетом кривизны линий тока SST модели, модели ζ -а и ζ -f).

Интенсификация теплообмена поверхностными вихрегенераторами – лунками представляется одной из актуальных задач теплофизики. Внимание к ней ученых всего мира не ослабевает. Традиционно и активно ей занимаются в РФ (некоторые из последних работ представлены в [3]). Важно подчеркнуть, что в отличие от большинства исследований отечественная школа развивает подход, основанный на аэродинамическом проектировании рельефов, а именно: на конструировании форм лунок по критериям тепловой и теплогидравлической эффективности. В этом контексте предложены и планомерно исследуются удлиненные овальные лунки, ориентированные под углом 45° к набегающему потоку. Акцент в данном исследовании делается на сравнительном анализе симметричных и несимметричных (овальных) форм лунок для интенсификации теплообмена. К сожалению, пока симметричные формы преобладают в инженерных разработках. Поэтому важно заострить внимание ученых и инженеров на их неэффективности.

Одной из перспективных концепций создания летательных аппаратов с высокими аэродинамическими характеристиками является управление обтеканием толстых тел, в том числе несущих поверхностей вихревыми ячейками. Ячейка представляет собой каверну на тыльной стороне омываемого контура тела, причем циркуляционное течение в уловленном вихре интенсифицируется одним из энергозатратных способов: распределенным (со стороны центрального тела) и сосредоточенным (щелевым) отсосом или вращением цилиндрического центрального тела [2].

Система из четырех малоразмерных эллиптических вихревых ячеек на контуре, состоящем из дуг окружностей, соединенных отрезком прямой линии, и имеющем толщину 37.5%, применяется в летательном аппарате ЭКИП и позволяет обеспечить практически безотрывное обтекание толстого профиля с высоким аэродинамическим качеством (порядка 20) и коэффициентом подъемной силы (порядка 2.5). Ячейка круговой формы применена для совершенствования характеристик толстого профиля MQ [4].

Система щелевого отсоса из вихревой ячейки с включением вентилятора в отводящем канале и выбросом струи в ближний след впервые предложена для стабилизации следа за круговым цилиндром и позволяет кардинально улучшить аэродинамические характеристики полукругового профиля, увеличивая его аэродинамическое качество от отрицательных величин до значений порядка 10 [1].

В данном исследовании внимание концентрируется на оценке времени существования уловленного вихря в круговой каверне на полукруговом профиле под нулевым углом атаки при отключении вентилятора. Этот параметр важен для конструирования системы управления расходом отсасываемого воздуха.

Соединение, на первый взгляд, разнородных материалов продиктовано как единым подходом к решению задач, так и их принадлежностью к общей проблеме управления вихревыми потоками.

1. Исаев С.А., Баранов П.А., Усачов А.Е. Многоблочные вычислительные технологии в пакете VP2/3 по аэротермодинамике // Саарбрюкен: LAP LAMBERT Academic Publishing. 2013. 316 с.
2. Исаев С.А., Баранов П.А., Гортышов Ю.Ф. и др. Аэродинамика утолщенных тел с вихревыми ячейками. Численное и физическое моделирование // Под ред. С.А. Исаева. СПб: Изд-во Политех. ун-та, 2016. 215 с.
3. Isaev S.A., Schelchikov A.V., Leontiev A.I., Gortyshov Yu.F., Baranov P.A. and Popov I.A. Tornado-like heat transfer enhancement in the narrow plane-parallel channel with the oval-trench dimple of fixed depth and spot area // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2017. Vol.109. P. 40–62.
4. Isaev S., Baranov P., Popov I., Sudakov A. and Usachov A. Improvement of aerodynamic characteristics of a thick airfoil with a vortex cell in sub- and transonic flow // Acta Astronautica. 2017. Vol.132. P. 204–2201

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 14-19-00003), а также при частичной государственной поддержке научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских вузах (ведущий ученый — С. Исаев, КНИТУ-КАИ, г. Казань) по гранту Правительства России № 14.Z50.31.0003.

Кабардин И.К.¹, Наумов И.В.¹, Окулов В.Л.¹¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: kabardin@itp.nsc.ru

В последние годы применение ветрогенераторов выросло до индустриального использования в сетевых электростанциях. В связи с этим интерес к задачам ветроэнергетики у исследователей значительно возрос. Аэродинамика вихревого следа за ветрогенератором существенно определяется динамикой винтовых концевых вихрей, срывающихся с края лопасти. Эти вихри были предметами многих теоретических, экспериментальных и численных исследований. Например, в работах [1-2] рассматривалась проблема устойчивости винтовой вихревой системы. В работе [3] показано, что в двумерном течении любое решение уравнения двумерной завихренности в ядре концевого вихря будет стремиться к вихрю Лэмба-Озеена. В численных исследованиях [4] охарактеризована структура следа и эволюция вихревого ядра, созданного однолопастным ротором. Было обнаружено самоподобие профилей завихренности. Несмотря на то, что было выявлено самоподобное поведение вихревого ядра, оказалось, что переменные масштабирования и подобию связаны с локальным азимутальным углом относительно центра ядра из-за эллиптической формы ядра [4].

Данная экспериментальная работа направлена на исследование автомодельности завихренности и компонент скорости в ядре концевых вихрей в следе за ротором ветрогенератора. В ходе работы вычислены азимутально-усредненные профили завихренности и компонент скоростей, и проведена попытка сравнения с моделью ядра спирального вихря Лэмба-Озеена [4].

В экспериментах модель ротора помещалась в водяной канал, длина которого составляла 35 м, ширина 3 м и рабочая высота 0,9 м [5]. Для проведения оптических измерений на расстоянии 20 м от начала канала располагался измерительный участок длиной 3 м, стенки и дно которого выполнены из стекла. Диаметр ротора составлял $2R = 0,376$ м. Контроль скорости потока осуществлялся независимым гидрометрическим измерителем скорости ОТТ Z400 в течение всего эксперимента. Скорость набегающего потока равнялась $V = 0,36$ м/с. Пульсации скорости потока в ходе экспериментов не превышали 3 %. Хорда лопасти и угол ее установки были рассчитаны по теории Глауэрта для оптимального ветряка с быстроходностью $\lambda = 5$, где $\lambda = \Omega R / V$, а Ω — угловая скорость вращения ротора. Числа Рейнольдса $Re = \rho \Omega R b / \mu$ равнялись 20 000 для быстроходности $\lambda = 5$, (ρ и μ — плотность и динамическая вязкость рабочей жидкости — водопроводной воды, b — длина хорды лопасти (1 см) в проведенных экспериментах, при рабочей температуре 20 °С. Крепление и фиксация ротора были выполнены на перемещаемой над каналом платформе на 0,6 м позади ротора, что-

бы минимизировать возмущения набегающего потока в плоскости ротора.

Поле скорости измерено методом цифровой трассерной визуализации (Particle image velocimetry, PIV). В качестве осветителя для формирования светового ножа применялся Nd: YAG импульсный лазер с характеристиками: 120 мДж энергии в импульсе, длина волны - 532 нм, частота срабатывания — 4.3 Гц. Лазерный нож толщиной 2 мм проходил вертикально через дно канала и ось ротора, перпендикулярно плоскости вращения лопастей. Регистрация изображения проводилась на две камеры Dantec HiSense II с разрешением 1344x1024 пикселей. Для вычисления трехмерного поля скорости использовалось программное обеспечение PIV — Dantec Dynamic Studio Version 2.21. Проводилась фазовая привязка к углу поворота ротора, позволившая провести фазовое усреднение.

По полученным полям скорости вычислялось поле завихренности, позволяющее определить координаты центров концевых вихрей в сечении лазерного ножа. Правильность вычисления центров вихрей также контролировались по профилям осевой и радиальных компонент скорости вблизи центра вихря. Обнаружено, что азимутально-усредненные профили завихренности скорости в ядре вихря для разных вихревых периодов являются автомодельными и укладываются на одну кривую, определяемую выражением:

$$\omega(\eta) = \exp(-\eta^2), \quad (1)$$

а также профили осредненной азимутальной скорости хорошо описываются формулой:

$$U_\theta(\eta) = \frac{\alpha(1 - e^{-\eta^2})}{\eta}. \quad (2)$$

Также обнаружено, что в ядре имеется осевая скорость, которая уменьшается при увеличении быстроходности.

1. Okulov V. L. On the stability of multiple helical vortices// J. Fluid Mech. 2004. V. 521. P. 319-342.
2. Okulov V. L., Sørensen J. N. Stability of helical tip vortices in a rotor far wake// J. Fluid Mech. 2007. V. 576. P. 1-25.
3. Wayne E. Vortices and two-dimensional fluid motion//Notice of the AMS. 2011. V. 58, № 1. P. 10-19.
4. Ali M., Abid M. Self-similar behavior of a rotor wake vortex core// J. Fluid Mech. 2014. V. 740, R1. P. 1 - 11.
5. Okulov V.L., Naumov I.V., Mikkelsen R.F., Kabardin I.K., Sørensen J.N. A regular Strouhal number for large-scale instability in the far wake of a rotor// J. Fluid Mech. 2014. V. 747: P. 369-380.

Кадыров А.И., Абайдуллин Б.Р.

¹ КазНЦ РАН, Казань

E-mail: aidarik@rambler.ru

В последнее время для интенсификации теплообмена применяют периодически расположенные ленточные вставки. Saha S.K. и др. [1] экспериментально исследовали теплогидравлические характеристики при течении масла в круглой трубе с периодически расположенными ленточными вставками ($Re=45...1150$; $Pr=205...518$). Lokanath [2] экспериментально исследовал ламинарное течение воды в трубе с ленточными вставками. Он показал преимущество использования периодически расположенных вставок по сравнению со сплошными. Eiamsa-ard S. и др. экспериментально исследовали влияние коротких спиральных и ленточных [3] вставок на процессы теплообмена в круглой трубе при $Re=2300...12000$. Короткие ленточные вставки также могут использоваться для уменьшения износа внешней стенки в изогнутых каналах [4].

При использовании периодически расположенных ленточных вставок существенным является определение эффективного расстояния между вставками. С развитием нефтехимической промышленности актуальным становится изучение закрученных потоков неньютоновских жидкостей, в частности псевдопластичных.

Настоящая работа посвящена определению эффективного расстояния между ленточными вставками при течении растворов Na-КМЦ, а именно определению расстояния, на котором поперечные составляющие вектора скорости соизмеримы с величиной среднерасходной скорости. Математическая модель подробно описана в работе [5]. Для описания реологического поведения водного раствора Na-КМЦ взят степенной реологический закон жидкости.

Анализ проведенных численных исследований показал, что распадающиеся вихри закрученного потока наиболее ярко выражены на расстоянии $D_{кр}^+$, при котором поперечные составляющие вектора скорости составляют не менее 20% от среднерасходной скорости (рис. 1). Здесь и далее $D_{кр}^+$ – относительное расстояние, измеряемое в диаметрах трубы и отсчитываемое от конца ленточной вставки, на котором $\sqrt{u^2 + v^2} \geq 0.2 \cdot V_a$.

На рисунке 2 представлена зависимость $D_{кр}^+(Re_n)$ для трех 0,67% Na-КМЦ, 1,5% Na-КМЦ, 3% Na-КМЦ, где число Рейнольдса вычислено с помощью формулы, представленной в [5].

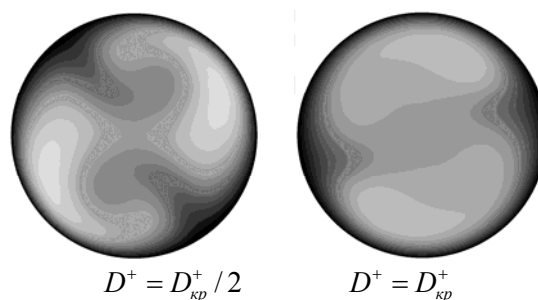


Рис. 1. Распределение относительной скорости ($\bar{V}/V_a$) в сечении трубы; $Re=507,68$; $S/D=4$, 1,5% Na-КМЦ

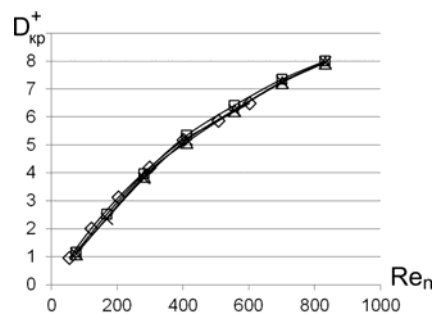


Рис. 2. Зависимость длины $D_{кр}^+$ от числа Рейнольдса: $\diamond$ – вода; $\square$ – 0,67% Na-КМЦ; $\triangle$ – 1,5% Na-КМЦ; $\times$ – 3% Na-КМЦ; $S/D=4$

1. Saha S.K., Dutta A., Dhal S.K. Friction and heat transfer characteristics of laminar swirl flow through a circular tube fitted with regularly spaced twisted-tape elements // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2001. №44. P. 4211–4223.
2. Lokanath M.S. Performance evaluation of full length and half length twisted tape inserts on laminar flow heat transfer in tubes, in proceedings of the 14th National Heat and Mass Transfer Conference and Third ISHMT-ASME Joint Heat and Mass Transfer Conference, IIT Kanpur, India, 1997, pp. 319–324, Paper No. HMT-97-031.
3. Eiamsa-ard S., Promvonge P. Enhancement of heat transfer in a tube with regularly-spaced helical tape swirl generators // Solar Energy. 2005. No. 78. P. 483–494.
4. Кадыров А.И., Вацагина Е.К. Математическая модель стационарного теплообмена и гидродинамики при ламинарном течении вязких реологически сложных сред в изогнутых каналах с закручивателем потока // Вестник казанского технологического университета. 2012. Т. 15. № 19. С. 49–52.
5. Абайдуллин Б.Р., Кадыров А.И. Особенности закрученного потока обобщенно-ньютоновской жидкости в круглой трубе // Труды Академэнерго. 2016. № 3. С. 11–22.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-31-00425 мол_а

**РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРИМЕРНЫХ СТРУКТУР
ПРИ ПРОБОЕ ЖИДКОГО ДИЭЛЕКТРИКА****Карпов Д.И.^{1,2}, Куперштох А.Л.^{1,2}**¹ Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск² Новосибирский государственный университет

E-mail: karpov@hydro.nsc.ru

Исследованы электрические характеристики стримерных структур, возникающих при пробое жидких диэлектриков. Расчеты развития стримеров выполнены с помощью разработанной авторами ранее стохастической модели роста в электрическом поле проводящих ветвящихся структур [1]. Для моделирования возникновения в диэлектрической среде новых проводящих участков стримерной структуры использован флуктуационный критерий роста (FFC), предложенный в работе [2]. Моделирование выполнялось на дискретной сетке с постоянным шагом по времени. На каждом шаге по времени распределение электрического поля в диэлектрике и структуре рассчитывалось из уравнения Пуассона с постоянными потенциалами на электродах в качестве граничных условий. Перенос электрических зарядов на каждом шаге рассчитывался из уравнения непрерывности для плотности зарядов в предположении, что на каждом участке канала выполняется закон Ома.

На каждом шаге по времени рост стримера был разрешен только с вершин ранее сформированной структуры. При этом вероятность роста зависела только от локальной напряженности электрического поля на вершине. На каждой вершине за один шаг по времени могло сформироваться несколько новых элементов структуры согласно критерию FFC. Это позволило моделировать не только искривление, а также и ветвление каналов стримера.

Ранее моделирование роста выполнялось на пространственных сетках размером порядка $100 \times 100 \times 100$ узлов, что соответствовало максимальному пространственному разрешению не лучше чем 10 - 20 мкм. При таком разрешении было невозможно смоделировать тонкую структуру стримера, так как размер вершины канала стримера $\sim 2 - 3$ мкм. В результате, полученные ранее значения для электрических характеристик стримера можно рассматривать как очень грубые оценки. Ограничения на пространственный размер сетки были обусловлены нехваткой на тот момент времени вычислительных мощностей.

В настоящей работе для моделирования стримеров разработан параллельный алгоритм роста на основе критерия FFC, а также параллельные алгоритмы расчета полей и токов в проводящей структуре стримера. Алгоритм реализован в виде программного кода на языке C с применением технологии CUDA для параллельного программирования на графических ускорителях (GPU). Созданные программы впервые позволяют проводить расчеты роста ветвящихся структур стримеров в жидком диэлектрике на сетках размером не менее $400 \times 400 \times 400$ узлов с пространственным разрешением не хуже 2.5 мкм за приемлемое время.

Выполнено моделирование роста стримера в миллиметровом зазоре между электродами в геометрии «острие-плоскость» при постоянном напряжении. Из сравнения с экспериментами по пробое в углеводородах [3, 4] получены значения параметров модели. На основании сравнения скорости роста структуры со скоростью роста стримера в эксперименте вычислены параметры в формуле для вероятности роста вершины канала. Из сравнения амплитуды токов получены оценки для средней удельной электропроводности вещества каналов. При моделировании удельная проводимость каналов стримера считалась постоянной.

Рассчитаны значения локальной напряженности электрического поля на кончиках каналов стримера. В расчетах получены более точные, чем ранее, оценки падения напряжения вдоль каналов стримера. Выполнены оценки заряда стримерной структуры и зарядов на кончиках стримерной структуры.

Показано, что даже при ненулевой проводимости структуры ток во внешней цепи имеет четко выраженный импульсный характер. Каждый импульс связан с формированием новых проводящих элементов структуры. Наибольшая амплитуда импульсов возникает при формировании элемента, обеспечивающего продвижение структуры вглубь разрядного промежутка.

Работа поддержана РФФ (грант № 16-19-10229).

1. Karpov D. I., Kupershtokh A. L. Models of streamers growth with "physical" time and fractal characteristics of streamer structures // Conf. Record of the 1998 IEEE Int. Symposium on Electrical Insulation, Arlington, Virginia, USA. 1998. V. 2. P. 607–610.
2. Kupershtokh A. L. Fluctuation model of the breakdown of liquid dielectrics // Sov. Tech. Phys. Lett. 1992. V. 18, No. 10., P. 647–649.
3. Lesaint O., Gournay P. On the gaseous nature of positive filamentary streamers in hydrocarbon liquids // J. Phys. D: Appl. Phys. 1994. V. 27. P. 2111–2127.
4. Chadband W.G. On variations in the propagation of positive discharges between transformer oil and silicon fluids // J.Phys.D: Appl.Phys. 1980. V. 13. P. 1299–1307.

АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ РАЗНОВЫСОТНОЙ КОМПОНОВКИ СЕКЦИЙ ВОЗДУШНО-КОНДЕНСАЦИОННЫХ УСТАНОВОК И СУХИХ ГРАДИРЕН ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СКОРОСТЯХ ВЕТРОВЫХ ПОТОКОВ

О.О.Мильман¹, С.Н. Ленев², П.В. Голов², Б.А. Шифрин¹, А.Ю. Картуесова¹

¹ ЗАО «НППП «Турбокон», Калуга

² ПАО «Мосэнерго», г. Москва

E-mail: turbocon@kaluga.ru

Требование к минимизации площади, занимаемой воздушно-конденсационными установками (ВКУ) или сухими градирнями (СГ), зачастую обязывает к многорядному расположению их секций. При этом отдельные секции оказываются расположенными в «теневой» зоне, создается неравномерность по расходам воздуха через различные секции, эффективность ВКУ в целом может снижаться. Ветровые потоки, в условиях которых зачастую работают ВКУ или СГ, могут создавать дополнительные помехи в работе вентиляторов ВКУ и усугублять эту неравномерность [1]. Одним из возможных мероприятий, позволяющих нивелировать этот негативный эффект, является разноуровневое по высоте расположение секций в ВКУ.

Целью работы являлось сравнительное исследование методами численного моделирования процессов совместной работы вентилятора и его сети (теплообменников) при ветровой нагрузке и без нее для двух вариантов трехрядных секций: одно- и разноуровневого. За основу конструкции самих секций принята V-образная компоновка секции [2].

Для выполнения численных расчетов на основе конструкции ВКУ, состоящего из трех рядов секций, были созданы соответствующие расчетные 3D – модели. Рассматривались два варианта компоновки: одноуровневая – все 3 секции расположены на одной и разноуровневая, когда передняя и задняя секции расположены выше средней.

При выполнении аэродинамических расчетов было принято, что в каждом ряду по его глубине расположено большое число секций, в связи с чем расчеты выполнялись в 2D-постановке. Каждая секция ВКУ включает в себя вентилятор и 2 теплообменных модуля, на которые накладывались граничные условия «внутренний вентилятор» и «пористая среда».

В результате расчетов получены массовые расходы по вентиляторам секций при отсутствии ветра и при ветре с разной скоростью, которые представлены на рис. 1.

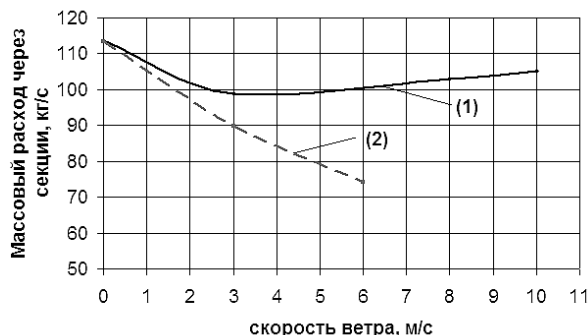


Рис. 1. График зависимости массового расхода от скорости ветра через секции ВКУ для разноуровневой (1) и одноуровневой (2) компоновок

При одноуровневой компоновке достаточно благополучная картина течения при отсутствии ветра претерпевает серьезные изменения уже при ветре 3 м/с суммарный расход на три секции уменьшается на $\approx 20\%$ по отношению расходу при отсутствии ветра. При увеличении скорости ветра до 6 м/с общий расход воздуха уменьшается уже на 35% по отношению к расходу при отсутствии ветра. При двухуровневой компоновке при ветре 3 м/с суммарный по трем секциям расход воздуха также уменьшается, но слабее, чем в одноуровневой компоновке (на $\approx 13\%$). Расход воздуха, достигнув минимума при 3...4 м/с, постепенно увеличивается, и при ветре 10 м/с составляет уже 92,5 % от расхода при отсутствии ветра.

Подводя итоги выполненных расчетов, можно заключить, что разноуровневая компоновка по всем показателям более предпочтительна, чем одноуровневая.

1. Жинев А.А., Шевелев Д.В. Исследование влияния ветра на производительность вентиляторов воздушно-конденсационной установки геотермальной электрической станции // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: машиностроение. 2015. №1.С. 108-118.
2. Мильман О.О., Федоров В.А. Воздушно – конденсационные установки. – М.: Изд – во МЭИ, 2002. – 208 с.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ ЗАРЯДОВ МАЛЫХ ДИАМЕТРОВ ПЛАСТИЧНОГО
ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

**Кашкаров А.О.^{1,3}, Прууэл Э.Р.^{1,3}, Тен К.А.^{1,3}, Рубцов И.А.^{1,3}, Кременко С.И.^{1,3},
Просвирнин К.М.², Киселев А.Н.², Косолапов И.Э.², Костицын О.В.², Лобойко Б.Г.², Музыря А.К.²**

¹ Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

² РФЯЦ, ВНИИ технической физики, Снежинск

³ Новосибирский государственный университет, Новосибирск

E-mail: kashkarov@hydro.nsc.ru

Регистрация быстропротекающих процессов сопутствующих взрывным явлениям с использованием синхротронного излучения (СИ) как источника рентгеновских импульсов – убедительно зарекомендовавший себя метод применяемый для исследования детонации и ударно-волновых явлений уже более десяти лет [1,2]. Идентичность рентгеновских импульсов СИ по спектру и распределению интенсивности в луче в течении эксперимента позволяет получать для исследуемого процесса распределение сжатия вещества на луче. Важной особенностью является то что регистрация данных не вносит возмущения в возникающее течение, что особенно важно для зарядов малых диаметров, использование контактных датчиков в которых может приводить к катастрофическим изменениям в наблюдаемом процессе.

В настоящей работе исследовались цилиндрические заряды пластичных взрывчатых веществ на основе тэна и гексогена диаметрами 5, 10, 15 мм. Регистрация возникающего за фронтом детонационной волны течения с последующим восстановлением его структуры и определением степени сжатия продуктов детонации производилась в поперечном сечении заряда на достаточном для установления стационарного режима расстоянии от места инициирования.

Для регистрации проходящего излучения ослабленного областью расширения продуктов детонации был использован новый детектор запущенный в работу в 2017 году, отличительной особенностью которого, по сравнению с более ранними работами авторов, является увеличенное в 4 раза временное разрешение. Использование этого детектора позволило получать многокадровое (до 100 шт) рентгеновское щелевое одномерное кино с пространственным разрешением до 0.1 мм, время экспозиции так же осталось около 1 нс, а интервал между кадрами теперь 124 нс.

Использование зарядов малых диаметров позволяет целиком уместить их в области регистрации СИ и контролировать симметрию распределения количества вещества как до прихода детонационной волны, так и при расширении продуктов. Цилиндрическая симметрия исследуемого процесса имеет принципиальное значение, так как позволяет ставить задачу томографии сжатия по одному ракурсу.

Решение задачи томографии предполагает проведение сглаживания экспериментальных данных, поскольку шумы приводят к знакопеременной производной, в то же время в возникающем течении имеются естественные резкие границы. Поэтому, при восстановлении структуры возникающего течения все разрывы выделялись явным образом, а сглаживание проводилось в областях где не ожидается скачков сжатия вещества.

Получаемые результаты можно представить в виде радиальной функции динамики сжатия вещества детонирующего заряда. Это позволяет явным образом сравнить структуру течения за фронтом детонации для исследуемых взрывчатых составов.

Погрешность определения количества вещества на луче СИ для статических образцов различной формы составляет не более 5% в зависимости от толщины просвечиваемого слоя. Для динамических экспериментов ожидается на аналогичном уровне.

1. Э.Р. Прууэл, К.А. Тен, Б.П. Толочко и др. Реализация возможностей синхротронного излучения в исследованиях детонационных процессов // Доклады Академии наук. Техническая физика. 2013. Т. 448. № 1. С. 38–42.
2. В.М. Титов, Э.Р. Прууэл, К.А. Тен и др. Опыт применения синхротронного излучения для исследования детонационных процессов // Физика горения и взрыва. 2011. Т. 47. № 6. С. 3–15.

Работа поддержана РФФИ (грант № 16-29-01050).

ДИФФУЗИЯ ВИНТОВОГО ВИХРЯ**Кашкарова М.В., Куйбин П.А.**

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

E-mail: m.agafontseva@gmail.com

В ходе работы технологических аппаратов с использованием закрученных течений могут возникать вихревые структуры. При изменении характеристик потока может произойти разрушение вихря. В процессе диффузии вихрь осциллирует, инициируя пульсации давления, которые, в свою очередь, приводят к затруднению работы и износу оборудования. Изучение данного вопроса является актуальным на сегодняшний день.

В данной работе проводится исследование винтового вихря с ядром малого диаметра, диффундирующего в однородной вязкой несжимаемой жидкости. Целью является найти функцию распределения завихренности в ядре вихря, а также влияние диффузии на пульсационные характеристики потока.

Для сведения задачи к двумерной использовались условия винтовой симметрии [1]. Решение полученного уравнения производилось с помощью метода двухмасштабного разложения [2], который предполагает получение решения в виде ряда, коэффициенты которого, есть решение системы дифференциальных уравнений.

Решение нулевого порядка для начальной стадии диффузии винтового вихря, которое верно как для прямолинейных, так и для любых искривленных вихрей – решение Ламба-Озеена. Решение записывается в локальных цилиндрических координатах в малой окрестности винтовой линии.

По истечении большого периода времени распределение завихренности вдали от вихря также

принимает форму распределения Ламба-Озеена, но записанное в глобальных цилиндрических координатах.

Что касается влияния диффузии на пульсации давления, индуцируемые винтовым вихрем на стенке сосной цилиндрической трубы, то здесь необходимо учитывать два эффекта. Со временем размер вихревого ядра растет и, как следствие, уменьшается перепад давления между максимальным и минимальным значением по сечению трубы; уменьшается и амплитуда пульсаций давления. В то же время радиус вихря увеличивается, т.е. вихрь движется все ближе к стенке, что вызывает рост пульсаций.

Само движение винтового вихря направлено по бинормали к винтовой линии; в результате вихрь и вращается и движется поступательно. Вклад в бинормальную скорость, обусловленный конечным размером вихревого ядра и неравномерностью распределения завихренности в ядре приведен в [1].

1. Алексеенко С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. – Новосибирск: Наука, Институт теплофизики, 2003. 504 с.
2. Березовский А.А., Капланский Ф.Б. Диффузия вихревого кольца // Механика жидкости и газа. – 1987. – Т. 22, – №. 6. – С. 832 – 837.

Работа поддержана РФФИ (грант № 15-08-05220, грант № 15-08-00186).

ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛЕЙ СКОРОСТИ В ТРЕХМЕРНЫХ ВОЛНАХ ПРИ ПЛЕНОЧНОМ ТЕЧЕНИИ ЖИДКОСТИ

Квон А.З.^{1,2}, Бобылев А.В.^{1,2}, Гузанов В.В.^{1,2}, Харламов С.М.^{1,2}, Маркович Д.М.^{1,2}

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

² Новосибирский государственный университет

E-mail: azkvon@gmail.com

Проведено экспериментальное измерение полей скорости в трехмерных (3D) волнах на поверхности вертикально стекающей пленки жидкости. Исследовались 3D волны, образующиеся в результате распада возбужденных двумерных волн (2D). В работе [1] было показано, что при переходе к трехмерному волновому режиму формируются цепочки 3D волн. При этом на осредненных полях толщин пленки наблюдалось формирование струй, показывающее, что происходит существенное перераспределение жидкости в поперечном направлении. Для понимания механизмов развития 3D волн, а так же формирования струй, необходимо определить области, в которых происходит приток жидкости в волну. С целью определения соответствующих участков волны были проведены одновременные измерения полей скорости жидкости на разных расстояниях от поверхности и измерения полей толщин.

В ходе экспериментов пленка воды формировалась на вертикальной пластине. Одновременно применялись оптические методы цифровой трассерной визуализации (ЦТВ) для измерения полей скорости и лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ) для получения полей толщин. Регистрация изображений для ЛИФ и ЦТВ проводилась одновременно одной камерой светового поля Raytrix R11m. Важной особенностью этой камеры является возможность регистрировать положение объекта в пространстве [2], при этом пространственное разрешение камеры по глубине может достигать до 1/40 от глубины резкости оптической системы [3]. Глубина резкости в экспериментах составляла 2 мм, таким образом разрешение по глубине достигало 50 мкм на слой. При применении метода ЦТВ поток засеивался полиамидными флуоресцентными частицами (5 мкм). Вектора скорости определялись по смещению изображений трассеров на двух последовательных кадрах. При измерениях методом ЛИФ, мгновенное распределение толщины пленки определялось по интенсивности свечения растворенного в жидкости флуорофора. Для возбуждения флуоресцентного свечения раствора и трассеров использовался лазер с длиной волны излучения 532 нм. Отраженное лазерное излучение отсекалось от камеры оранжевым фильтром, в то время как переизлученный от частиц и раствора свет с большей длиной волны свободно регистрировался. Яркость фона на получаемых изображениях соответствовала свечению пленки жидкости, а яркие пятна - трассерам. Как показано в [1] для некоторых режимов течения формирование 3D волн происходит в одном и том же месте и носит периодический характер, обусловленный периодичностью возбуждаемых 2D волн. Это позволяет синхронизировать изме-

рительную систему и регистрировать 3D волны в выбранном месте течения в одинаковой фазе, что позволяет набирать достаточную для определения поля скорости статистику.

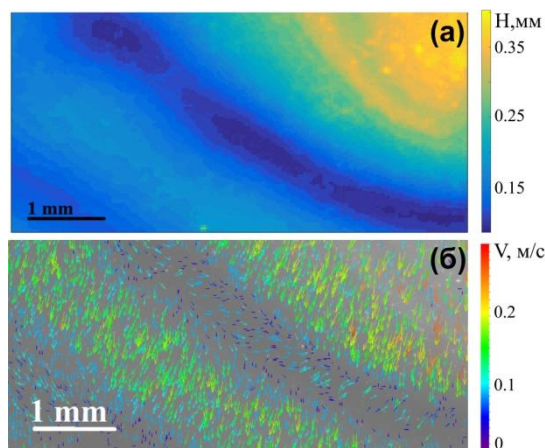


Рис. 1. Распределение толщины пленки (а) и поле скорости в слое от 80 мкм до 160 мкм над пластиной (б). Волна движется сверху вниз. Вода. $Re=40$.

На рис.1 (а) показана структура 3D волны, восстановленная с помощью метода ЛИФ. Соответствующее данной волновой структуре поле скорости показано на рис. 1 (б). Полученные характерные значения скорости соответствуют результатам математического моделирования в [4]. Видно, что течение имеет сложную структуру, и при этом можно выделить характерные зоны перетока жидкости в поперечном направлении. Так, в области капиллярного предвестника наблюдается течение жидкости направленное к центральной части волны.

1. Kharlamov S. M., Guzanov V. V., Bobylev A. V., Alekseenko S. V., & Markovich D. M. The transition from two-dimensional to three-dimensional waves in falling liquid films: Wave patterns and transverse redistribution of local flow rates. // *Physics of Fluids*. 2015. 27. P. 114106-1 -114106-25.
2. Cenedese A., Cenedese C., Furia F., Marchetti M., Moroni M., Shindler L. 3D particle reconstruction using light field imaging. // *16th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, Lisbon, Portugal. 2012
3. Середкин А.В., Токарев М.П. Алгоритмы обработки изображений камеры светового поля и их применение для оптической диагностики потоков. // *Вычислительные методы и программирование*. 2016. Т.17. С.224-233
4. Dietze G. F., Rohlf's W., Nährich K., Kneer R. & Scheid B. Three-dimensional flow structures in laminar falling liquid films.// *Journal of Fluid Mechanics*. 2014. 743. P. 75-123.

Работа поддержана РФФИ (грант №15-0106702-а).

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИССИПАЦИИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ЗАРЯДА В АВИАЦИОННОМ КЕРОСИНЕ, НАХОДЯЩЕМСЯ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ТОПЛИВНОМ БАКЕ**Э.Л. Китанин¹, П.А Кравцов², В.А Трофимов², Е.Э. Китанина¹, Д.А. Бондаренко³**¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия²ФГБУ Петербургский институт ядерной физики (НИЦ КИ), Гатчина, Россия³ФГБОУВО Московский авиационный институт, Москва, Россия

E-mail: elkitanin@mail.ru

Основная цель работы – экспериментальное исследование процесса диссипации электростатического заряда в авиационном топливе, находящемся в баке из композитного материала, имеющего электропроводность существенно более низкую, чем топливо. Экспериментальное исследование моделирует условия, при которых топливо в значительной мере электризуется, проходя по трубопроводам и топливным фильтрам, и попадает в баки, имея заметный электростатический заряд. Поскольку баки в настоящее время часто изготавливаются из полимерных материалов, процесс релаксации заряда в баке протекает медленно и, следовательно, появляется возможность возникновения разряда в баке, что недопустимо по требованиям безопасности. Поэтому необходимо снизить напряженность электрического поля в баке, т.е. вывести электрический заряд из топлива. Для этого требуется создать специальные электропроводящие мосты между топливом и металлическими элементами конструкции самолёта, с которых электрический заряд отводился бы в окружающую среду. При характерной электропроводности топлива 10^{-11} См/м и объёме баков до 100 м^3 время диссипации заряда может быть большим, и необходимо исследование процесса нейтрализации статического электричества с целью оптимизации его скорости.

Диссипация топливного заряда в натурных условиях происходит за счёт утечки заряда через возможные контакты (металлические элементы конструкции бака), имеющие заземление. В экспериментальном исследовании для имитации реальных контактов были предусмотрены специальные клеммы, расположенные в различных точках диэлектрического бака. В ходе экспериментов исследовано влияние количества клемм и их расположения в баке на скорость диссипации топливного заряда.

В экспериментах использован полипропиленовый бак объёмом 0.5 м^3 , проводимость которого, согласно справочным данным, лежит в диапазоне 10^{-14} – 10^{-15} См/м. В состав стенда входят также питающий бак, топливный насос, бак для подготовки топлива, система подачи и регулирования расхода инертного газа, система трубопроводов с регулирующей и запорной арматурой и система измерений. Исследование процесса требует измерения очень малых токов, поэтому для устранения наводок от внешних полей бак был полностью экранирован. Изменение плотности заряда измерялось специально изготовленным прибором – электрометром, имеющим высокую чувствительность и обеспечивающим измерение токов в

широком диапазоне 10^{-11} – 10^{-6} А. Измерения проводились одновременно в нескольких точках в объеме топлива с использованием специально изготовленных зондов.

На стенах и днище бака были установлены заземляемые клеммы, что позволило провести исследование диссипации при разном количестве заземлённых клемм и при их расположении в различных зонах бака.

Топливо направлялось в экспериментальный бак через участок трубопровода, находящийся под высоким напряжением, бак заполнялся заряженным топливом и далее проводился эксперимент по исследованию тока разряда, т.е. по исследованию диссипации электростатического заряда в топливе.

Результаты измерений разрядных токов передавались в компьютер. Кроме разрядного тока в восьми датчиках в экспериментах измерялись температура топлива, избыточное давление азота в пространстве над зеркалом топлива в экспериментальном баке, уровень топлива в баке.

В общей сложности было выполнено 11 серий экспериментов. Было исследовано: влияние количества заземлённых контактов и температуры топлива и бака на процесс разряда топлива, влияние самих измерительных каналов на скорость диссипации, а также влияние величины и знака заряжающего напряжения на процесс диссипации. Проведённые исследования позволили оценить реальное сопротивление стенок бака, выделить и оценить величину и влияние сопротивления поверхностных слоёв топлива, прилегающих к измерительным зондам.

В работе также представлены результаты численного моделирования процесса диссипации заряда в топливе ТС-1 с помощью программного пакета COMSOL, при условиях, соответствующих условиям экспериментального исследования. Проведённые расчёты показали достоверность экспериментального материала по скорости диссипации. Показано, что снижение температуры топлива приводит к уменьшению скорости диссипации заряда в топливе. Расхождение результатов экспериментов и численного моделирования при комнатной температуре не превышало 20%.

1. Дубовкин Н.Ф. и др. Физико-химические и эксплуатационные свойства реактивных топлив, Справочник // М.: Химия, 1985, 240 с.
2. Handbook of aviation fuel properties // Coordinating Research Council, Inc. Third Edition. 2004

Князева А.Г.^{1,2}, Крюкова О.Н.²¹ Томский политехнический университет, 643050, Томск² Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634055, Томск

E-mail: anna-knyazeva@mail.ru

Аддитивные технологии - новые наукоемкие производственные технологии, стремительно развивающиеся в различных отраслях от космоса до медицины. К аддитивным технологиям можно отнести и синтез покрытий на подложках, управляемый электронным лучом. Математическому моделированию подобных технологических процессов посвящены многочисленные публикации.

Предсказание свойств материалов в аддитивных технологиях и в процессах управляемого синтеза на основе физического моделирования условий их получения сталкивается с серьезными проблемами в связи со сложной взаимосвязью явлений, приводящих к формированию состава, структуры и свойств и отсутствием данных о свойствах сложных материалов. Например, сопряженный теплообмен может приводить к неоднородному фазовому составу и неравномерной пористости. Послойное формирование материала связано с неоднократными термическими циклами, приводящими к появлению остаточных напряжений в сопрягаемых слоях, которые оказывают влияние на динамику процесса и на свойства получаемого материала. Дополнительные проблемы возникают, когда в процессе сплавления и спекания образуются новые химические соединения и фазы, которые влияют не только конечные свойства изделия, но и изменяют динамику процесса синтеза.

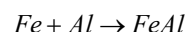
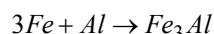
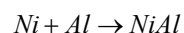
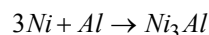
В настоящей работе предложены двумерные математические модели синтеза материалов из смесей порошков, образующих интерметаллидные соединения (Ti-Ni, Al-Ni, Ti-Al), в условиях современных технологий лазерного и электроннолучевого сплавления. Учитываются особенности поглощения лазерного излучения порошком и зависимость оптических свойств от пористости в модели синтеза, управляемого лазерным излучением; принимаются во внимание особенности поглощения энергии электронного луча в объеме. Скорости процесса, а также малые размеры зоны прогрева и области, занятой расплавом, позволяют описывать процесс усадки и изменение пористости с помощью кинетических законов.

Термокинетические модели поверхностной электронно-лучевой и лазерной обработки уже в простейшем приближении (без учета гидродинамики ванны расплава, изменения фазового состояния и реологических свойств среды) предсказывают правдоподобное изменение толщины порошкового слоя с температурой при изменении кинетических параметров.

Для термически тонкой пластины или тонкого покрытия и тонкого поверхностного слоя подложки, как и в [1-3], пренебрегаем распределением температуры по глубине. Перераспределение элементов в этом направлении как намного более медленный процесс явно не рассматриваем, однако полагаем, что

частично расплавляемый слой подложки и расплавленное покрытие быстро перемешиваются, что приводит к химическому взаимодействию материалов.

Простейшая схема химических реакций, например, для системы Ni-Al, наплавляемой на железо, имеет вид



В этом случае имеем три кинетических уравнения для реагентов и четыре уравнения для продуктов реакции. Скорости химических реакций зависят от температуры по закону Аррениуса, от концентраций – в соответствии с законом действующих масс. Тепловыделение в реакциях учитывается в уравнении теплопроводности.

Явно гидродинамику расплава не анализируем. Однако учитываем конвективный перенос массы, связанный с изменением толщины наплавляемого слоя вследствие усадки [4].

Задача решена численно. В некоторой области изменения технологических параметров внешний нагрев сопровождается химическими превращениями. На квазистационарной стадии зона реакции распространяется с постоянной скоростью, равной скорости движения источника. На этой стадии «устанавливаются» максимальная температура, максимальные значения концентраций новых фаз, зависящие от энергии и скорости движения управляющего источника (лазера или электронного луча).

Возможно построение модели для более детальной кинетической схемы.

Аналогичным образом строятся модели и анализируются условия формирования нужного фазового состава для иных интерметаллидных систем.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 16-58-00116.

Литература

1. Князева А.Г., Крюкова О.Н., Сорокова С.Н. Моделирование управляемого синтеза покрытия на подложке // Изв. Вузов. Физика. 2009. № 8/2. С. 417-420
2. Князева А.Г., Сорокова С.Н. Моделирование синтеза интерметаллида на подложке цилиндрической формы // Физическая мезомеханика. 2009. Т.12, № 5. С. 77-90
3. A.I. Gordienko, A.G. Knyazeva, I.L. Pobel, Coating synthesis controlled by electron-beam heating, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 140 (2016) 012018 doi:10.1088/1757-899X/140/1/012018
4. Knyazeva A. Kinetics of powder layer shrinkage during electron-beam Treatment // Journal of Physics: Conference Series 754 (2016) 042009

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВОГО РАСШИРЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ НА ОСНОВЕ НЕОДИМА И САМАРИЯ

Козловский Ю.М., Савченко И.В., Самошкин Д.А., Яцук О.С.

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

E-mail: yaocarbon@gmail.com

Целью настоящей работы являлось измерение термического коэффициента линейного расширения (ТКЛР) некоторых технически важных соединений систем Nd-Fe-B и Sm-Co, а также изучение влияния остаточной намагниченности на плотность и ТКЛР образцов.

Тепловое расширение исследовалось дилатометрическим методом на установке горизонтального типа DIL-402C производства фирмы NETZSCH (Германия) с держателем и толкателем, изготовленными из плавленого кварца или спеченного корунда. Образцы зажимались между держателем и толкателем с усилием 45 сН, которое поддерживалось постоянным в ходе каждого эксперимента. Удлинение измерялось индуктивным датчиком перемещения (LVDT) с разрешением 1 нм, а температура – термопарой (тип E или S), коромек которой располагался в непосредственной близости от боковой поверхности образца. Измерения проводились в интервале температур 170–780 К для образцов системы Nd-Fe-B и 293–1163 К для образцов системы Sm-Co при нагреве–охлаждении печи со скоростью 2 К/мин и получасовой изотермической выдержке при минимальной и максимальной температурах. Перед экспериментами установка вакуумировалась (1 Па) и заполнялась гелием (99,995 об. %). Учет нелинейности характеристики датчика перемещений, отличия в температурах и коэффициентах линейного расширения материалов держателя и толкателя и т.д. проводился путем измерения нулевого хода дилатометра.

Установка, методика проведения измерений и обработки результатов апробировались в экспериментах с образцами высокочистых алюминия, меди и платины. Сопоставление результатов измерений с наиболее достоверными литературными данными [1, 2] показало, что отличие в значениях ТКЛР не превышает 3%. Непосредственно до и после экспериментов проводились контрольные измерения линейных размеров, массы и намагниченности образцов.

В качестве образцов были выбраны 3 марки системы Nd-Fe-B – N35M, N35H, N35SH и 4 марки системы Sm-Co – YX-18, YX-24 и YXG-22, YXG-30. Разные марки отличаются друг от друга диапазоном рабочих температур, величиной коэрцитивной силы и значением точки Кюри.

Для каждой марки исследуемых сплавов было проведено 2 серии экспериментов: первый цикл нагрева–охлаждения до рабочей температуры без потери исходной намагниченности и второй – до температуры, превосходящей точку Кюри, что равноценно полному размагничиванию. Анализ показал, что отличие ТКЛР намагниченных и размагниченных образцов лежит в пределах оцениваемых систематических погрешностей, но превышает доверительные границы (95%) случайных (рис. 1).

На рисунке 2 также представлены некоторые полученные результаты.

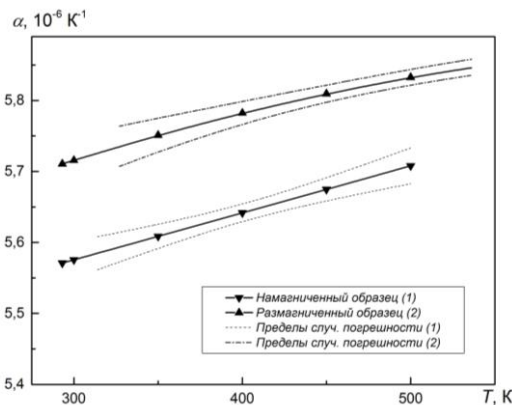


Рис. 1. ТКЛР саамрий-кобальтового магнита марки YX-24 до и после размагничивания

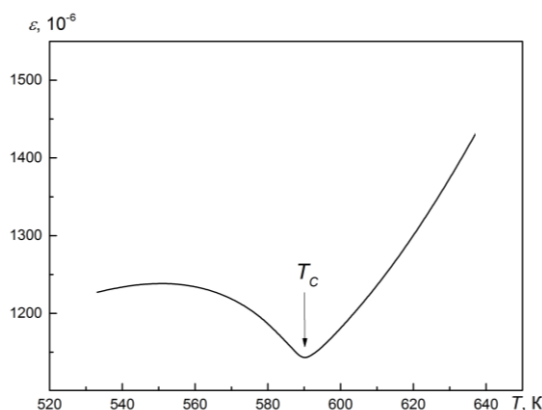


Рис. 2. Относительное удлинение неодимового магнита марки N35M в области точки Кюри

Для всех исследованных соединений получены таблицы рекомендуемых значений ТКЛР и относительного удлинения, а в области точки Кюри была проведена обработка скейлинговскими зависимостями [3], что позволило рассчитать критические индексы.

Список литературы:

1. Kroeger F.R., Swenson C.A. Absolute linear thermal expansion measurements on copper and aluminium from 5 to 320 K // J. Appl. Phys. 1977. Vol. 48, No. 3. P. 853–864.
2. Kirby R.K. Platinum, a Thermal Expansion Reference Material // Int. J. Thermophys. 12 (1991) 679.
3. Dolejsi D.A., Swenson C.A. Experimental thermal expansivities for single crystal gadolinium near the Curie temperature // Phys. Rev. B: Condens. Matter. 24 (1981) 6326–6335.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 15-38-20223

ВЫСОКОТОЧНЫЕ ПОЛИНОМИАЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ КЛАССИЧЕСКИХ ЗАДАЧ СТЕФАНА

Кот В.А.¹

¹ Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН РБ,
220072, Беларусь, Минск, ул. П. Бровки, 15

E-mail: valery.kot@hmti.ac.

Под задачей Стефана понимают класс математических моделей, описывающих в основном тепловые и диффузионные процессы, сопровождающиеся фазовыми превращениями с поглощением либо выделением скрытой теплоты [1]. Аналитические подходы в решении данных задач сильно ограничены и дают, как правило, решения с низкой аппроксимационной точностью, которая намного ниже точности, обеспечиваемой численными методами [2–4].

В работе изложены результаты решения классической задачи Стефана при переменных во времени граничных условиях Дирихле, Неймана и Робина (данное условие включает конвективный теплообмен при наличии теплового потока). Математическая формулировка задачи для температурной функции $T(x, t)$ в области $(x, t) \in [0, s(t)] \times (0, t_1]$ при разных граничных условиях имеет вид:

$$T_t = \kappa T_{xx}, \quad 0 < x < s(t), \quad t > 0$$

$$T = h(t); \quad -\lambda T_x = q(t); \quad \alpha T_x + \beta T = \gamma(t), \quad (x = 0)$$

$$T = T_m, \quad -\lambda T_x = \rho L_m s_t, \quad x = s(t), \quad t > 0$$

$$s(t) = 0, \quad t = 0.$$

Здесь $\kappa = \lambda / c\rho$ – коэффициент температуропроводности; λ , ρ , c , L_m – коэффициент теплопроводности, плотность, удельная теплоемкость и скрытая теплота плавления на единицу массы соответственно.

На основе введения в рассмотрение интегральных граничных характеристик [5, 6] в виде ($n = 1, 2, \dots$)

$$H_n \equiv \int_0^t dt \dots \int_0^t h dt; \quad Q_n \equiv \int_0^t dt \dots \int_0^t q dt; \quad Y_n \equiv \int_0^t dt \dots \int_0^t \gamma dt$$

получены три последовательности из тождественных равенств, подынтегральные выражения которых содержат искомую температурную функцию $T(x, t)$. Так, для условия Неймана данная последовательность приобретает вид ($n \in \mathbb{Z}_+$)

$$\mathcal{L}_n T_x + \text{Ste}^{-1} \sum_{k=1}^n S_n^k(t) \equiv Q_n(t), \quad \forall n \in \mathbb{Z}_+,$$

где $\text{Ste} = c(T_{\text{ref}} - T_m) / L_m$, T_{ref} – референтная температура, $\mathcal{L}_n(\cdot)$ – интегральный оператор [6], $S_n^k(s)$ – интегральная функция. Посредством представления искомой температурной функции в виде полинома

$T(x, t) = \sum_{j=0}^N a_j(t)(x/s)^j$ удастся свести задачу к дифференциальному уравнению порядка $N-1$.

В тестовой задаче при заданном тепловом потоке ($T_x = -\exp(t)$, $\text{Ste} = 1$, $T_x = -\exp(t-x)-1$, $s(t) = t$) полином пятой степени дает для $s(t)$ при $t=1$ ошибку $\varepsilon_s = |s/s^* - 1| \cdot 100\% = 1,8 \cdot 10^{-7}\%$, что на несколько

порядков меньше численных решений [2–4]. Решения можно условно считать точными (см. рис. 1).

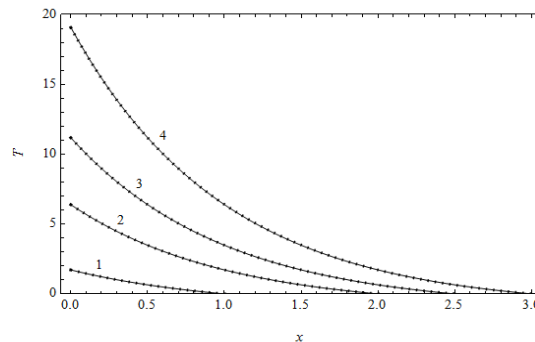


Рис. 1. Температурные профили в расплаве при тепловом потоке $q(t) = \exp(t)$ и числе Стефана $\text{Ste} = 1$ в моменты времени $t = 1$ (1); 2 (2); 2,5 (3); 3 (4): сплошная линия – точное решение, пунктирная – полином ($N = 4$).

Получены высокоточные полиномиальные решения для многих практически важных случаев. В частности, решена задача Стефана при гармонически изменяющейся во времени температуре поверхности по закону $h(t) = 1 + 0.5 \sin(0.5\pi t)$ (см. рис. 2).

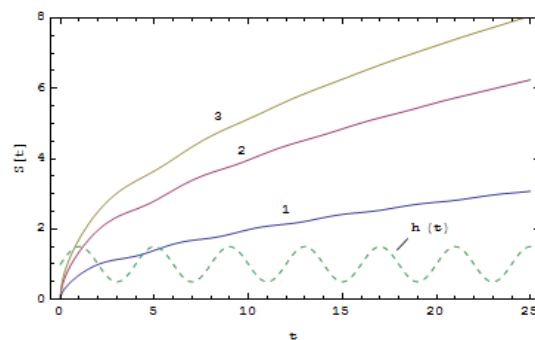


Рис. 2. Изменение во времени положения межфазной границы при гармоническом законе изменения температуры поверхности и числах Стефана $\text{Ste} = 0,2$ (1); 1 (2); 2 (3).

1. Gupta S.R. The Classic Stefan Problem. Basic Concepts, Modeling and Analysis. Amsterdam: Elsevier, 2003. 385 pp.
2. Kutluay B., Bahadir A.R., Ozdes A. The numerical solution of one-phase classical Stefan problem // J. Comput. Appl. Math. 1997. V. 81. No. 1. P. 135-144.
3. Caldwell J., Savovic S., Kwan Y.Y. Nodal integral end finite difference solution of one-dimensional Stefan problem // J. Heat Trans. (ASME). 2003. V. 125. No. 3. P. 523-527.
4. Mitchell S.L., Vynnycky M. Finite-difference methods with increased accuracy and correct initialization for one-dimensional Stefan problems // Appl. Math. and Comput., 2009. V. 215. No. 4. P. 1609-1621.
5. Kot V.A. Integral Method of Boundary Characteristics: The Dirichlet Condition. Principles // Heat Transfer Research. 2016. V. 47. No 10. P. 927-944.
6. Кот В.А. Интегральный метод граничных характеристик в решении задачи Стефана: условие Дирихле // ИФЖ. 2016. Т. 89. № 5. С. 1301-1327.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНЕГО АКУСТИЧЕСКОГО ВОЗМУЩЕНИЯ НА ДИНАМИКУ ПОТОКА И ФРОНТА ПЛАМЕНИ В ИМПАКТНОЙ СТРУЕ

Кравцов З.Д.^{1,2}, Шараборин Д.К.^{1,2}

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

² Новосибирский государственный университет

E-mail: tatan.91@mail.ru

В работе представлены исследования динамики потока и фронта пламени предварительно-перемешанной смеси, поступающей из осесимметричного сопла и натекающей на плоскую металлическую пластину на расстоянии двух калибров от сопла. Данный объект представляет собой резонатор при хорошо контролируемых условиях, позволяющий проводить фундаментальные исследования термоакустических явлений в реагирующих потоках. Для анализа влияния наличия преграды на динамику потока были проведены исследования в условиях внешнего периодического возмущения потока акустическим полем.

Измерения выполнены панорамными методами: плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции НСНО (ПЛИФ) и анемометрии по изображениям частиц (англ.: particle image velocimetry, PIV). Измерения двумя системами были синхронизированы во времени. PIV система состоит из двух импульсных лазеров Nd:YAG (более 50 мДж в импульсе длительностью 10 нс на длине волны 532 нм), лучи которых сведены к одной оси, и двух ПЗС камер (4 Мпикс, 8 бит). Две камеры были использованы для трех компонент вектора скорости в области, освещаемой лазерным ножом. НСНО ПЛИФ система включала интенсифицированную ПЗС камеру (4 Мпикс, 16 бит) и импульсный Nd:YAG лазер (более 180 мДж в импульсе длительностью 10 нс на длине волны 355 нм). Регистраторы были оснащены объективами с соответствующими оптическими фильтрами

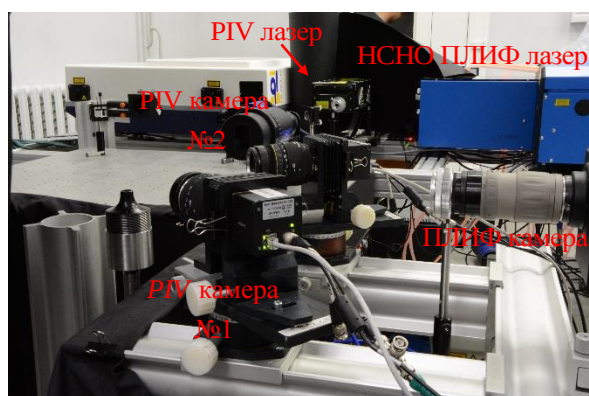


Рис. 1. Фотография экспериментального стенда

Для пропановоздушной смеси определена карта режимов горения при варьировании числа Рейнольдса и эквивалентного отношения топлива, а также при изменении расстояния от сопла до импактной поверхности, измерены пределы расходов для уноса пламени. Были проведены измерения динамики фронта пламени и поля мгновенной скорости мето-

дом НСНО ПЛИФ одновременно с методом PIV в стереоскопической конфигурации. Исследованы конфигурации с импактной поверхностью и без неё. Частота воздействия равнялась 130 Гц, что соответствовало числу Струхала равному 1.2. Выбор частоты воздействия обусловлен тем, что она соответствует основной гармонике (резонансной частоте) трубы, в которой происходит смешение топлива и воздуха перед поступлением смеси в сопловой блок.

В монографии Афанасьева и Кидина (2008) был сделан вывод, что пульсации давления приводят к вынужденному периодическому формированию торoidalных вихрей вблизи кромки сопла, которые деформируют фронт пламени и приводят к периодическому изменению площади фронта пламени, что в свою очередь приводит к порождению волн давления. Данный механизм не нашёл подтверждения в данной работе. Был сделан вывод, что волны давления в трубе приводят к осцилляции продольной скорости в струе и периодическим деформациям и растяжению фронта пламени.

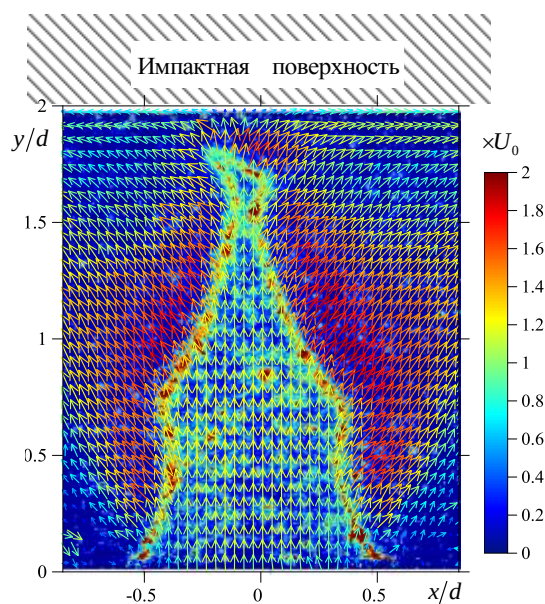


Рис. 2. Распределение мгновенной скорости (вектора) и сечение фронта пламени (цветное изображение) в центральной плоскости потока, натекающего на плоскую преграду на расстоянии двух калибров, при горении пропановоздушной смеси в форме и внешнем акустическом возмущении конуса ($Re_{\text{воздух}} = 1500$, $\Phi = 0.95$, $U_0 = 1.6$ м/с)

1. Афанасьев В.В., Кидин Н.И. Диагностика и управление устойчивостью горения в камерах сгорания энергетических установок. - М.: Физматлит, 2008.

Работа выполнена при финансировании РНФ (грант № 16-19-10566).

СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА И ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ ОТ МАССОВОЙ ДОЛИ (ДО 20%) НЕКОНДЕНСИРУЮЩИХСЯ ГАЗОВ В ПАРОВАЗОВОЙ СМЕСИ

Мильман О.О.^{1,2}, Крылов В.С.^{1,2}, Кондратьев А.В.^{1,3}, Птахин А.В.^{1,3}

¹ ЗАО «НПВП «Турбокон», Калуга

² Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского

³ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал

E-mail: turbocon@kaluga.ru

При сжигании метана в среде водяного пара внутри высокотемпературной паротурбинной установки кроме водяного пара образуется также углекислый газ. Поскольку его удаление из проточной части турбины затруднительно, возникает необходимость в разработке специального конденсатора, позволяющего конденсировать паровоздушную смесь (ПВС) с высоким массовым содержанием неконденсирующихся газов. При этом его конструкция должна обеспечивать высокий коэффициент теплоотдачи α и массообмена β от парогазовой смеси к стенкам труб на фоне роста концентрации неконденсирующихся газов по мере конденсации пара из ПВС [1]. Расчет такого устройства не имеет методической базы и надежных экспериментальных данных для определения α и β . Для решения поставленных задач были разработаны стенды модуля высокоэффективного конденсатора и рабочего участка. По результатам их испытаний планируется получение экспериментальных зависимостей, обоснование принципов проектирования и разработка расчетных методик.

Описание стендов. Подвод пара в стенд высокоэффективного конденсатора производится через паровой коллектор с дросселирующей решеткой, после которой пар подается к трубным пучкам. Перед первым трубным пучком осуществляется измерение давления ПВС. Пар конденсируется на 6 группах

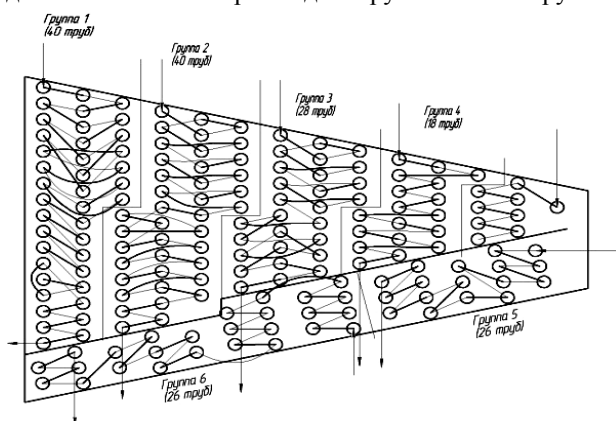


Рис. 1. Расположение групп трубных пучков экспериментального образца высокоэффективного конденсатора. трубных пучков (рис. 1).

Внутреннее пространство высокоэффективного конденсатора организовано таким образом, чтобы обеспечить постоянство скорости ПВС по мере конденсации пара. Разбивка теплообменных труб на отдельные пучки с измерением температуры на сливе из каждого пучка позволяет детально рассмотреть теплоотдачу от ПВС по ходу её продвижения через конденсатор.

Стенд рабочего участка предназначен для прямого определения коэффициента теплоотдачи α для труб при конденсации на них ПВС с различным содержанием неконденсирующихся газов.

Для реализации поставленной цели в стенки четырёх теплообменных труб, изготовленных из меди, впаяны термопары, по 4 на трубу – сверху и снизу, на входе и на выходе охлаждающей воды. Остальные трубы (общее число труб 32) не охлаждаются водой и присутствуют для моделирования сопротивления трубного пучка (рис.2). В трубах первого ряда имеются отверстия $d=1\text{ мм}$ для вырыска конденсата с целью имитации конденсации на первых рядах трубного пучка.

По разности между средней температурой стенки трубы и температурой насыщения пара напрямую вычисляется коэффициент теплоотдачи.

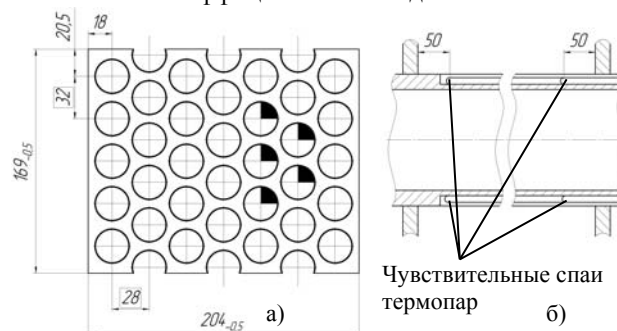


Рис. 2. а) трубная доска стенда рабочего участка. Закрашены трубы, охлаждаемые водой. б) схема закладки термопар в стенку трубы

Выводы:

1. Создан стенд для исследований процессов конденсации ПВС с высокой долей неконденсирующихся газов.
2. Проведены прямые измерения коэффициентов теплоотдачи α от теплообменных труб при конденсации на них ПВС с высокой долей неконденсирующихся газов, получены зависимости $\alpha=f(x)$, где x – массовая доля неконденсирующихся газов в ПВС.

1. Конденсаторы паротурбинных установок / В.А. Федоров, О.О. Мильман; Под ред. Издательство МГТУ им Н.Э. Баумана, 2013.г. 163 с.
2. Исследование и расчёт конденсационных устройств паровых турбин / Шкловер Г.Г., Мильман О.О. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 240 с.

Работа поддержана Минобрнауки России (уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57614X0049).

ИССЛЕДОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ УГЛЕЙ МИКРОПОМОЛА РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНИ МЕТАМОРФИЗМА

Бурдуков А.П.¹, Бутаков Е. Б.¹, Кузнецов А.В.

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

E-mail: temkansu@yandex.ru

Уголь является одним из важнейших энергоносителей в мире. По прогнозам, к 2020 году доля угля в мировой энергетике будет достигать 50%, в первую очередь это связано с весьма вероятным сокращением потреблением нефти и газа, а также пересмотром политики по развитию атомной энергетики.

В настоящее время, большинство угольных ТЭЦ работают с использованием нефтепродуктов для запуска и поджигки котла во время работы. Стоимость этих нефтепродуктов значительно превышает стоимость самого угля, а значит введение новых технологий, позволяющим исключить нефтепродукты из энергетических процессов, протекающих на ТЭЦ является актуальным.

Разработанная в ИТ СО РАН технология механоактивации углей позволяет исключить газ или мазут из цикла работы промышленного котла, эта технология проверена на крупном огневом стенде мощностью 5МВт, представленном на рисунке 1. В результате экспериментов было получено, что механоактивированный уголь обладает повышенной химической активностью, воспламеняется и горит с последующим выходом на автотермический режим подобно газомазутному топливу. [1]



Рис. 1. – Огневой стенд ИТ СО РАН мощностью 5МВт.

Актуальным остается вопрос о реакционных характеристиках углей, полученных при механоактивационном измельчении и влиянии эффекта механоактивации на воспламенение и последующее горение угля. В данной работе проводятся исследования угля по двум различным методикам: определение температуры самовоспламенения углей в вертикальной трубчатой печи, рисунок 2, и дифференциально-термический анализ для определения кинетических характеристик углей.

Эксперименты проводились для углей различной степени метаморфизма, начиная от бурого и

заканчивая антрацитом, перед испытаниями определялся состав углей.

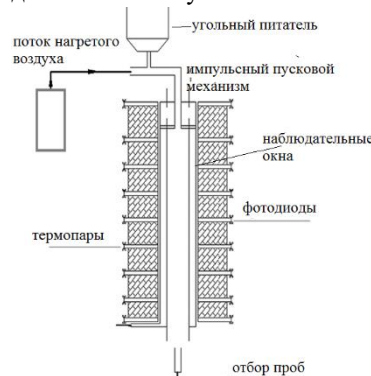


Рис. 2. – Вертикальная трубчатая печь.

Эксперименты на вертикальной трубчатой печи показали, что при механоактивационном измельчении изменяется температура воспламенения проб углей, а по результатам ДТА стоит отмечено, что энергия активации угольного топлива зависит от его измельчения и меняется в процессе его выгорания.

Выводы.

Эксперименты показали значительное улучшение качества угольного топлива, прошедшего механоактивационное измельчение, что позволяет эффективно его использовать в технологии замещения газа и мазута.

Список литературы:

1. Burdukov A.P., Butakov E. B., Popov V.I., Chernetskiy M. Yu., Chernetskaya N. S. The use of mechanically activated micronized coal in thermal power engineering // Thermal Science. – 2016. – Vol. 20. – P. 23 – 33.

«Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по Соглашению о субсидии № 14.607.21.0150 (Уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI60716X0150)»

Кузнецов В.В.

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

E-mail: vladkuz@itp.nsc.ru

В связи с быстрым ростом приложений, которые требуют передачи больших тепловых и массовых потоков в ограниченном пространстве, все большее внимание в последнее время уделяется разработке двухфазных микроструктурных устройств, которые характеризуются чрезвычайно большим отношением площади поверхности к объему. На их основе создаются перспективные технологии охлаждения компьютерных процессоров и лазерных зеркал, двухфазные компактные теплообменники, мини- и микроканальные парогенераторы, конденсаторы и установки альтернативной энергетики [1]. Ключевую роль в обосновании двухфазных микроструктурных устройств играют фундаментальные закономерности газожидкостных течений и процессов переноса при фазовых переходах в микроразмерных системах, представленные в данной работе.

Рассмотрено современное состояние исследований и представлены новые результаты в области капиллярной гидродинамики газожидкостных течений и процессов тепломассопереноса при кипении, конденсации и испарении в микроразмерных системах.

Обсуждены определяющие закономерности газожидкостных течений в мини- и микроканалах, рассмотрено влияние поперечного размера канала на режим течения и его свойства в условиях доминирующего влияния капиллярных сил, предложены новые подходы к определению границ режимов течения на основе анализа их статистических характеристик и модели эквивалентной толщины пленки жидкости.

Развита модель кольцевого течения и теплообмена при фазовых превращениях в прямоугольных микроканалах двухфазных компактных теплообменников. Модель основана на выделении течения жидкости в углу канала, ограниченного межфазным мениском, и пленочного течения на стенке. После получения решений в этих областях, они согласовываются на линии сопряжения. Уравнения движения дополнены кинематическим условием на поверхности жидкости и интегральным уравнением сохранения массы для системы пленка-мениск. Для пленочного течения при $\varepsilon = \delta_0/a \ll 1$, где δ_0 - начальная толщина пленки жидкости и a - половина ширины длинной стороны канала, уравнения Навье-Стокса сводятся к уравнению:

$$(\gamma m^3 + 1.5 \frac{\kappa}{\varepsilon} m^2)_x + (m^3 m_{yy})_y = \frac{3}{\varepsilon^4} (Ga (\frac{m_y}{m})_y - \frac{G_0 \Theta_{w,i}}{m \varepsilon}), \quad (1)$$

где $\gamma = 1 - (dp_g/dx)/\rho_f g$, $\kappa = \pm \tau / \rho g a$, $Bo = \rho_f g a^2 / \sigma$, $Ga = A_0 / (6 \pi a^2 \sigma)$. Здесь $m = \delta / \delta_0$ - толщина пленки, продольная x и поперечная y координаты обезразмерены на aBo/ε и a соответственно, τ - трение на поверхности, $G_0 = \lambda_f T_* v_f / (h_{fg} a)$, $\Theta_{w,i} = (T_{w,i} - T_s) / T_*$, A_0 - константа Гамакера, h_{fg} - скрытая теплота парообразования, $T_{w,i}$ - внутренняя температура стенки и T_s -

температура насыщения. Характерная температура T_* определяется разностью температур внешней стенки и насыщения, поток массы на межфазной поверхности определен по модели кондуктивного переноса тепла в пленке. В процессе численного решения определяется момент разрыва пленки и установления новой конфигурации, состоящей из ривулетов, менисков и сухих пятен. После нахождения межфазной поверхности, уравнения теплопроводности для жидкости и стенки решаются совместно. Расчеты по предложенной модели устанавливают степень влияния капиллярных сил на распределение фаз по периметру канала и показывают принципиальное отличие теплообмена при испарении и конденсации, вызванное интенсивным теплообменом в окрестности контактной линии при испарении, они хорошо соответствуют экспериментальным данным.

Представлены закономерности сопряженных гидродинамических и тепломассообменных процессов при фазовых переходах в микроразмерных системах, предложены новые подходы к расчету теплообмена и кризисных явлений в условиях совместного влияния вынужденной конвекции, пузырькового кипения и испарения сверхтонкой пленки жидкости. Развита метод расчета теплообмена при кипении движущейся жидкости в микроструктурных теплообменных устройствах и системах охлаждения. Предложено рассчитывать коэффициент теплоотдачи как суперпозицию коэффициентов теплоотдачи при пузырьковом кипении h_{boil} с учетом подавления кипения при толщине пленки жидкости, сравнимой с диаметром критического зародыша (фактор Ψ_{sup}), двухфазной конвекции h_{con} и испарении тонкой пленки жидкости h_{ev} с учетом ее разрыва и образования сухих пятен:

$$h_p^2 = (h_{con} F)^2 + (h_{boil} \Psi_{sup} S)^2 + (E \phi h_{ev})^2 \quad (2)$$

Здесь E - доля поверхности канала вдоль потока и ϕ - доля поперечного сечения канала с жидкой пленкой, F и S - параметры интенсификации вынужденной конвекции и пузырькового кипения соответственно [3]. Показано хорошее соответствие результатов расчета теплообмена и экспериментальных данных.

Рассмотрено применение микроразмерных систем в перспективных технологиях отвода экстремально больших потоков тепла, энергетических и криогенных устройствах, системах кондиционирования, химических и биотехнологиях.

1. Kuznetsov V.V. Heat and mass transfer with phase change and chemical reactions in microscale // Proc. International Heat Transfer Conference IHTC14. Washington, D.C., 2010. Paper 22570.
2. Kuznetsov V.V., Shamirzaev A.S. Flow Boiling Heat Transfer of Refrigerant R-134a in Copper Microchannel Heat Sink // Heat Transf. Eng. 2008. V. 37. P. 1105-1113.

Работа поддержана РФФИ (грант № 14-49-00010).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ СЛЕДОВ ИСПАРЯЮЩИХСЯ КАПЕЛЬ В РАЗОГРЕТОМ ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ

Войтков И.С.¹, Волков Р.С.¹, Высокоморная О.В.¹, Кузнецов Г.В.¹, Стрижак П.А.¹

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск

E-mail: vysokomornaja@tpu.ru

Одной из ключевых проблем при выборе параметров технологических процессов с использованием испарения капельных потоков жидкостей в высокотемпературных (более 600 К) газовых средах остается [1–4] задача достоверного прогноза температуры и концентрации капель и паров воды. Основными причинами сдерживания развития соответствующих технологий являются недостаточные знания о сложных теплообменных процессах и эндотермических фазовых превращениях (мало достоверных экспериментальных данных), протекающих при движении капель и паров воды в нагретых до высоких температур газах.

Цель настоящей работы – экспериментальное исследование особенностей снижения температуры в следе капли воды при их обтекании потоком горячего воздуха, а также выделение определяющих тепло-массообменных процессов и фазовых превращений.

На рис. 1 приведена схема использованного экспериментального стенда.

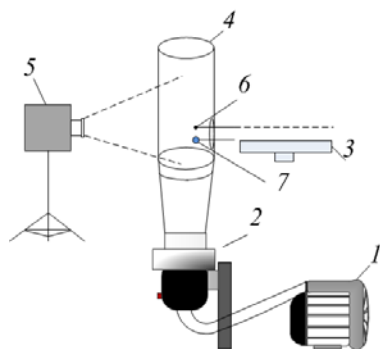


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – нагнетатель потока воздуха; 2 – воздухонагреватель; 3 – координатный механизм; 4 – кварцевый цилиндр; 5 – высокоскоростная видеокамера; 6 – термopapa; 7 – капля воды

В качестве камеры с высокотемпературным газовым потоком (разогретым воздухом, $T_g^0 \approx 473\div 773$ К) использовался цилиндр (диаметр – 0.15 м, высота – 0.3 м) из кварцевого стекла с технологическим отверстием (диаметр – 0.015 м) в боковой стенке (на отметке по высоте цилиндра – 0.15 м). Начальный объем (V_d) капля воды варьировался в диапазоне 10–20 мкл. Капля с известным начальным радиусом R_d помещалась на нихромовую проволочку (диаметр 0.1 мм), закрепленную на координатном механизме 3 (рис. 1). С применением последней капли воды вводились в цилиндр 4 с разогретым воздухом через боковое технологическое отверстие в цилиндре. На этом же координатном механизме выполнены крепления малоинерционной термopapy 6. С применением высокоскоростной (до 10^5 кадров в секунду) видеокамеры 5 и программного обеспечения Tema Automotive выполнялась регистрация размеров (радиусов) капель. Температурным следом капли считалась

область за ней, в которой температура газов (смеси паров воды и воздуха) T_g была меньше T_g^0 . На внешней границе этой области (следа) выполняется условие $T_g \approx T_g^0$. Соответственно, аэродинамическим (скоростным) следом считалась область за каплей, в которой выполняется условие $U_g < U_g^0$ (на внешней границе следа $U_g \approx U_g^0$).

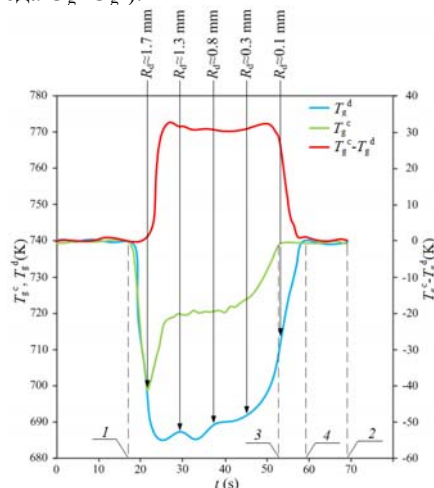


Рис. 3. Изменение во времени температуры в следе испаряющейся капли воды (T_g^d) и сферической частицы глины (T_g^c) при $T_g^0 \approx 743$ К и удалении термopapy от обтекаемого тела на расстояние $l \approx 4$ мм (1, 2 – моменты внесения и вынимания обтекаемых тел из набегающего потока; 3, 4 – моменты восстановления температуры в следе обтекаемых тел (T_g^c и T_g^d) до значения T_g^0)

Проведенные эксперименты позволили выделить два механизма снижения температуры в следе капель воды – за счет охлаждения воздуха в результате теплообмена и интенсивного парообразования. Установлено, что роль процесса испарения при формировании температурного следа капля воды вне зависимости от схемы их расположения существенно усиливается при повышении температуры потока газов. Повышение скорости движения потока воздуха до 5 м/с приводит к существенному росту аэродинамического следа капля (более, чем в 4 раза), но при этом в следе капли уменьшение температуры воздуха происходит слабее в 2–3 раза. При анализе температурного и аэродинамического следов группы двух капля установлено, что при их последовательном и параллельном расположении совместное влияние капля на температуру в следе довольно значительно.

1. Sazhin S.S., Elwardany A.E., Krutitskii P.A., Depredurand V., Castanet G., Lemoine F., Sazhina E.M., Heikal M.R. Multi-component droplet heating and evaporation: numerical simulation versus experimental data // Int. J. Therm. Sci. 2011. V. 50. P. 1164–1180.

Работа поддержана грантом Президента РФ МД-1221.2017.8.

ЭСТАФЕТНЫЙ МЕХАНИЗМ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ ПРИ ЛИНЕЙНО НАРАСТАЮЩЕМ НАПРЯЖЕНИИ

Куперштох А.Л.^{1,2}, Карпов Д.И.^{1,2}

¹ Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный университет

E-mail: skn@hydro.nsc.ru

Выполнено двумерное стохастическое моделирование частичных разрядов (ЧР) в цепочке газовых каверн, расположенных вдоль линии электрического поля с постоянным шагом h на близком расстоянии друг от друга. Для конденсированного диэлектрика принималось $\varepsilon = 2$. На каждом шаге по времени во всей области между электродами рассчитывался потенциал электрического поля с учетом переноса зарядов при микрозарядах внутри каверн [1,2].

Использовался стохастический критерий возникновения ЧР в кавернах – MESTL [3]. Функция $r(E)$, описывающая зависимость вероятности возникновения ЧР от локального электрического поля E в каверне, учитывает пороговый характер явления [4]

$$r(E) = \begin{cases} 0 & \text{при } E \leq E_*, \\ \alpha(E - E_*) & \text{при } E > E_*. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь E_* – минимальное значение электрического поля, выше которого в каверне возможен микрозаряд. Напряжение пробоя воздуха в каверне размером $d \sim 10$ мкм примерно равно 350 В [5], что соответствует пороговому полю $E_* \approx 350$ кВ/см.

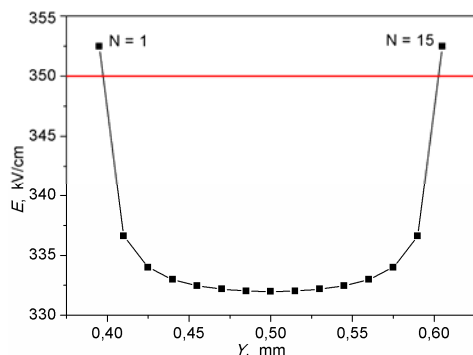


Рис. 1. Значения электрического поля внутри каверн перед первым частичным разрядом. $L = 1$ мм. Сетка 200×200 .

При линейно нарастающем напряжении $V = \gamma t$ в какой-то момент электрическое поле в крайних кавернах становится больше порогового (рис. 1). При этом появляется вероятность ЧР в одной из крайних каверн (или в обеих). После этого напряженность поля в соседней каверне становится больше пороговой (рис. 2) и там тоже возникает ЧР. В результате в цепочке каверн возникает волна частичных разрядов с “эстафетным” механизмом распространения (рис. 2, 3). Этот механизм реализуется при относительно малом расстоянии между кавернами и достаточно резкой зависимости $r(E)$. Порядок возникновения ЧР в кавернах становится стохастическим (рис. 3), когда значения электрического поля в ряде внутренних каверн оказываются больше критического (рис. 4). В приведенных расчетах принималось $\gamma = 10$ кВ/мс.

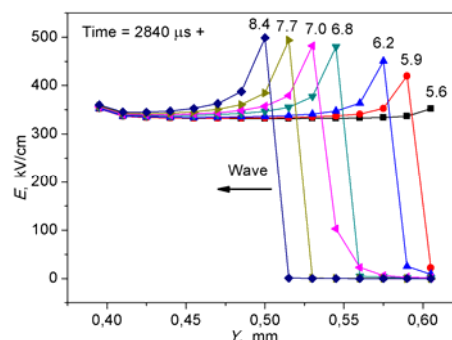


Рис. 2. Значения электрического поля внутри каверн по мере распространения волны ЧР.

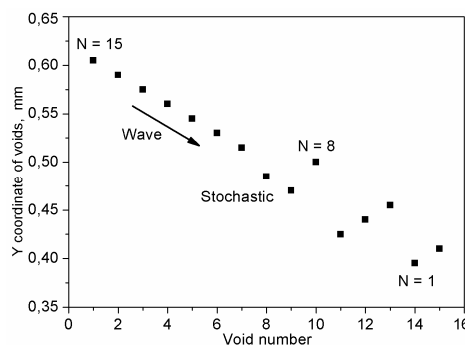


Рис. 3. Последовательность частичных разрядов.

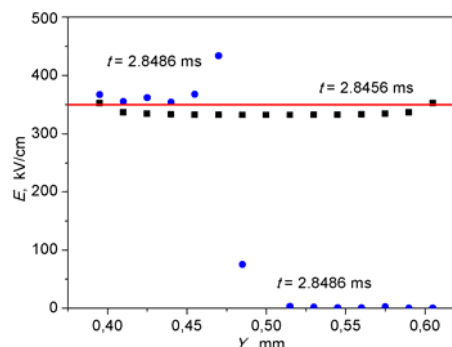


Рис. 4. Значения электрического поля внутри каверн перед первым ЧР (■) и во время стохастической стадии (●).

1. Kupershtokh A.L., Stamatelatos C.P., Agoris D.P. Simulation of partial discharge activity in solid dielectrics under AC voltage // Technical Phys. Lett. 2006. V. 32, No. 8. P. 680–683.
2. Kupershtokh A.L., Karpov D.I. Simulation of waves of partial discharges in a chain of gas inclusions located in condensed dielectrics // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 754, No. 10. P. 102006.
3. Kupershtokh A.L., Charalambakos V., Agoris D., Karpov D.I. Simulation of breakdown in air using cellular automata with streamer to leader transition // J. Phys. D: Appl. Phys. 2001. V. 34, No. 6. P. 936–946.
4. Wu K., Suzuoki Y., Dissado L.A. The contribution of discharge area variation to partial discharge patterns in disk-voids // J. Phys. D: Appl. Phys. 2004. V. 37, No. 13. P. 1815–1823.
5. Peschot A., Poulain C., Bonifaci N., Lesaint O. Electrical breakdown voltage in micro- and submicrometer contact gaps (100 nm – 10 μm) in air and nitrogen // Proc. IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. 2015. pp. 280–286.

Работа поддержана РНФ (грант № 16-19-10229).

Ларионов К.Б.¹, Мишаков И.В.^{1,2}, Зенков А.В.¹¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск² Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, НовосибирскE-mail: laryk070@gmail.com

Современный вектор развития угольной энергетики основан на технологическом совершенствовании оборудования и процессов, протекающих в нём, с целью повышения экологических и технико-экономических показателей работы топливосжигающих установок [1]. Одной из перспективных технологий является каталитическое сжигание угля в топках котлов [2]. Применение каталитических добавок для интенсификации процессов горения твердого топлива оказывает существенное влияние на кинетику процесса. Сдвиг реакции горения в низкотемпературную область способствует уменьшению выброса оксидов азота и серы, при одновременном возрастании средней скорости горения [3].

Основные исследования в области каталитического горения [1-4] направлены на использование оксидов редкоземельных и переходных металлов, способствующих снижению энергии активации возгонки летучих веществ, приводящей к сдвигу начальной температуры зажигания углей.

В настоящей работе представлен результат экспериментального исследования процесса окисления каменного угля при добавлении промотирующей добавки CuSO_4 .

В работе был использован образец каменного угля марки Д (Длиннопламенный) полученный в Егорово-Красноярской шахте. Исходный образец измельчали в шаровой мельнице и затем фракционировали на ситах с размером ячеек менее 80 мкм. Технические характеристики исследуемого образца определялись согласно стандартным методам [5] и приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Состав исходного угля

Показатель	Ед. измерения	Значение
Аналитическая влага	масс. %	4,9
Летучие		18,1
Зольность		11,2
Углерод		65,8

Иницирующая добавка CuSO_4 наносилась на образец угля методом пропитки в водо-спиртовом растворе. После смешения угля высушивались в сушильном шкафу при температуре 105 °С в течение 20 часов. Содержание CuSO_4 в приготовленном образце составляло 5 мас.%.

Экспериментальное исследование проводилось с использованием синхронного термического анализатора Netzsch STA 449 F3 Jupiter (Germany). Все эксперименты были выполнены в идентичных условиях, при скорости нагрева образца 2,5 °С/мин в корундовом тигле (масса образца 7 мг) в интервале температур 50-600 °С. В качестве окислительной среды была

использована смесь воздуха и азота со скоростью потоков 60 мл/мин и 10 мл/мин, соответственно.

На рисунке 1 представлены результаты термического анализа образцов в виде ТГ и ДТГ-кривых. Видно, что введение иницирующей добавки CuSO_4 приводит к снижению температуры зажигания угля приблизительно на 35 °С.

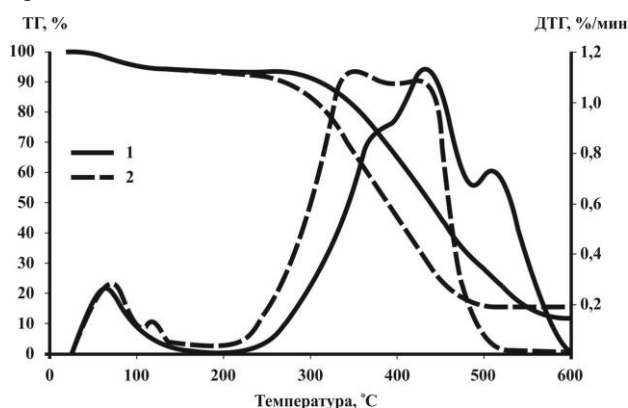


Рис. 1. ТГ и ДТГ- кривые исследуемых образцов углей (1 – образец сравнения каменного угля, 2 - образец каменного угля с добавкой CuSO_4)

Следует отметить, что снижение температуры зажигания также сопровождается увеличением средней и максимальной скорости протекания процесса термического разложения и реакции.

Эффект увеличения скорости окисления каменного угля в случае модифицирования сульфатом меди, вероятнее всего, объясняется разложением CuSO_4 в низкотемпературной области, которое предшествует процессу высвобождения летучих веществ. Разложение иницирующей добавки способствует интенсификации процесса диффузии кислорода к поверхности частиц угля. Также отметим, что в результате внутреннего отвода тепла происходит интенсивное термическое разрушение структуры углей, состоящей из большого числа микро- и макропор.

Список литературы:

- Cheng J., Zhou F., Xuan X., Liu J., Zhou J., Cen K. Cascade chain catalysis of coal combustion by Na-Fe-Ca composite promoters from industrial wastes // Fuel, 2016, Volume 181, Pages 820-826.
- Пармон В.Н., Симонов А.Д., Садыков В.А., Тихов С.Ф. Каталитическое сжигание: достижения и проблемы // Физика горения и взрыва, 2015, т.51, №2, С. 5-13.
- Mochida I., Sakanishi K. Catalysts for coal conversions of the next generation // Fuel, 2000, Volume 79, Pages 221-228.
- Gong X., Guo Z., Wang Z. Reactivity of pulverized coals during combustion catalyzed by CeO_2 and Fe_2O_3 // Combustion and Flame, 2010, Volume 157, Pages 351-356.
- Li Q., Lin Y., Exergy analysis of the LFC process // Proc. International Heat, 2016, V.108, P.348-354.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, в рамках реализации проекта №13.7644.2017/БЧ.

Современные мировые тенденции вовлечения низкосортных твердых топлив для энергетики становятся актуальными, в особенности для регионов с дефицитом генерации в виду транспортных и климатических условий. Несмотря на некоторый существующий задел в области изучения и моделирования процессов конверсии биомассы и сопутствующих химических преобразований, в настоящее время активно ведутся расчетные и экспериментальные исследования в этой области. Причины этого заключаются в высокой сложности описываемых процессов, особенно при разработке новых конструктивных решений. На сегодняшний день недостаточная глубина проработки теоретического описания процесса пиролиза заставляет для каждого нового технического решения осуществлять физическое моделирование с целью уточнения замыкающих соотношений. В настоящей работе представлены результаты численного моделирования пиролиза в шнековом реакторе разрабатываемой многоступенчатой схемы газификации низкосортного твердого топлива. На первой стадии процесса организуется аллотермический процесс пиролиза древесной щепы с использованием тепла генераторного газа и выхода силовой установки. Анализ существующих работ [1–4] показывает необходимость рассмотрения детального моделирования пространственно распределенных процессов тепломассопереноса, в том числе моделей кинетики химических реакций, с учетом естественных ограничений, вытекающих из законов сохранения. Для описания кинетики пиролиза используются данные термического анализа. Наиболее перспективным является представление уравнений тепломассообмена в 3d форме, при этом проблема корректного учета замыкающих соотношений в такой постановке не является исключительным свойством подобных детализированных описаний в виду недостаточной изученности многопараметрических моделей, описывающих пиролизные аппараты. В связи с этим каждые новые математические модели требуют верификации с привлечением результатов многофакторных экспериментальных исследований.

Детальное численное моделирование пиролизера выполнено в пакете Comsol Multiphysics, при этом одной из поставленных задач было создание оптимальной по быстродействию реализации с учетом необходимости проведения оптимизационных вычислений. Реализована модель, учитывающая: теплообмен в гомогенном представлении содержимого пиролизера с учетом пористости и проницаемости; движение образующихся газообразных продуктов реакций внутри шнекового реактора; движение и теплообмен греющих газов во внешней оболочке шнекового реактора; распределение концентраций образующихся продуктов реакций, в том числе паров воды и кокса. -Расчетная сетка имеет три плотности

построения: для газов, твердых тел и пористой среды. В широком диапазоне режимных условий получены распределения температур и подтверждено достижение необходимого для процесса пиролиза времени нахождения топлива в требуемых термических условиях. Включение в модель теплообмена кинетического блока позволило определить поля концентраций образующихся веществ (рис.1).



Рис. 1. Рассчитанное поле концентрации водяных паров.

1. Wang G., Li W., Li B., & Chen H. (2008). TG study on pyrolysis of biomass and its three components under syngas. *Fuel*, 87(4), 552-558. DOI 10.1016/j.fuel.2007.02.032.
2. Han F., Meng A., Li Q., & Zhang Y. (2016). Thermal decomposition and evolved gas analysis (TG-MS) of lignite coals from Southwest China. *Journal of the Energy Institute*, 89(1), 94-100. DOI 10.1016/j.joei.2015.01.007.
3. Meng X., de Jong W., Badri F. S., Benito P., Basile F., Verkooyen A. H. (2012). Combustion study of partially gasified willow and DDGS chars using TG analysis and COMSOL modeling. *Biomass and bioenergy*, 39, 356-369. DOI 10.1016/j.biombioe.2012.01.032.
4. Khodaei H., Al-Abdeli Y. M., Guzzomi F., Yeoh G. H. (2015). An overview of processes and considerations in the modelling of fixed-bed biomass combustion. *Energy*, 88, 946-972. DOI 10.1016/j.energy.2015.05.099.

Работа выполнена в ИСЭМ СО РАН на уникальной научной установке «Высокотемпературный контур» при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 16-19-10227).

Лежнин С.И.^{1,2}, Алексеев М.В.¹, Прибатурин Н.А.¹

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

² Новосибирский государственный университет

E-mail: lezhnin@itp.nsc.ru

При разгерметизации ёмкостей и трубопроводов энергетических установок, заполненных водой под высоким давлением, происходит выброс перегретой воды с резким понижением давления в зоне разрыва, образованием в окружающем пространстве волны сжатия и дальнейшим формированием струи вскипающего теплоносителя [1]. Если термодинамические параметры теплоносителя (давление, температура) находятся в закритической области, возможен случай, когда параметры флюида при истечении проходят не только через кривую насыщения- «кипения», но и через кривую- «конденсации» [2]. При этом процесс адиабатического расширения, в общем случае, проходит в неравновесном режиме. Создание сопряженной неравновесной модели кипения и конденсации в терминологии феноменологического релаксационного уравнения является задачей данной работы.

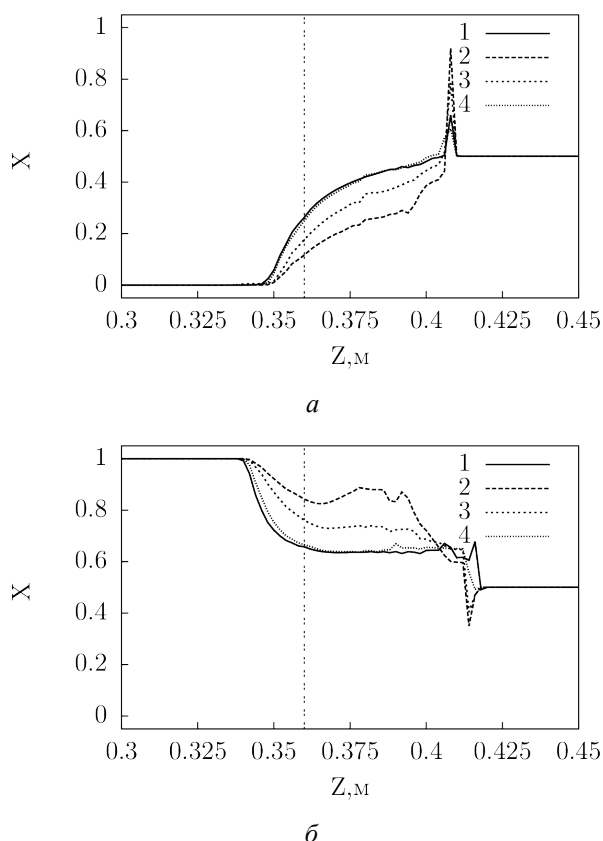


Рис. 1. Осевые профили массового паросодержания в момент времени $t=60$ мкс при различных значениях времени релаксации. а – $P=23$ МПа, $T=643$ К, б – $P=23$ МПа, $T=653$ К (1 – равновесная модель фазового перехода, 2 – $\theta=10^{-4}$ с, 3 – $\theta=5 \cdot 10^{-5}$ с, 4 – $\theta=10^{-5}$ с), вертикальная линия – координата торца канала (область канала слева от линии, область модельной атмосферы справа от линии)

Ранее в работе [3] была предложена аналитическая релаксационная модель, предназначенная для исследования процесса неравновесного вскипания (парообразования) и построенная на основе решения тепловой задачи в перегретых водяных каплях. Из-за малой плотности пара капельная структура двухфазной среды является характерной даже при небольших массовых паросодержаниях (но умеренных и больших объемных) [4].

В данной работе предложена интерполяция релаксационной модели на случай протекания неравновесной конденсации. Для этого было получено уравнение состояния гомогенной неравновесной двухфазной среды с переохлажденным паром. Проведены тестовые расчёты процессов испарения и конденсации при постоянном времени релаксации и сравнение с результатами, полученными при реализации термодинамически равновесной модели двухфазной смеси. На рисунке 1 приведены результаты расчета осевых профилей массового паросодержания для случая разгерметизации трубного канала и истечения водяного теплоносителя в модельную парожидкостную атмосферу с одинаковым сверхкритическим значением давления, но с различными температурами [2]. Модель также верифицировалась на различных экспериментальных данных.[5,6]

Представленная модель требует доработки, в частности, для уточнения значений времени релаксации при конденсации. Время релаксации существенно изменяется в зависимости от термодинамических условий двухфазной среды в процессе истечения. Далее будут проведены расчёты по модифицированной модели для меняющегося в динамических условиях времени релаксации.

1. Алексеев М.В., Вожаков И.С., Лежнин С.И., Прибатурин Н.А. Особенности эволюции волн давления, генерируемых вскипающим теплоносителем // Теплофизика и аэромеханика. – 2016, Т.23, № 6. – С.897-906.
2. Vozhakov I.S., Alekseev M.V., Lezhnin S.I., Pribaturin N.A. Modeling wave processes at the outflowing of a water coolant with supercritical initial parameters // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 754, Paper No.032021.
3. Лежнин С. И., Вожаков И. С., Алексеев М. В., Богомолов А. Р. Релаксационная модель парообразования для описания истечения вскипающей жидкости в область низкого давления // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2016, № 5. – С. 88-96.
4. Нигматулин, Р.И. Динамика многофазных сред, Том I / Р.И. Нигматулин – М: Наука, Глав. ред. физ.-мат. лит-ры, 1987. – 330 с.
5. Салтанов, Г. А. Сверхзвуковые двухфазные течения, Минск: Выш. Шк., 1972
6. Zapolski P.- D., Bilicky Z., Bolle L., Franco J. The non-equilibrium relaxation model for one-dimensional flashing liquid flow // Int. J. Multiphase Flow. – 1996, Vol.22, No.3. – P.473 – 483.

Работа поддержана РФФ (грант № 14-29-00093).

Лепешкин А.Р.¹¹ ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», Москва

E-mail: Lepeshkin.ar@gmail.com

Для определения теплового состояния различных деталей двигателей и машин требуется знание теплофизических свойств материалов и покрытий, в частности, температуропроводности и теплопроводности. Исследования температуропроводности металлических материалов с учетом эксплуатационных факторов: в поле действия ускорений и сил и теплозащитных керамических покрытий (ТЗП) в условиях газопламенного нагрева являются сложными проблемами и их решение имеет важное значение для авиакосмической техники.

Тепловые расчеты ГТД и их элементов выполняются по классическим моделям и во многих случаях плохо согласуются с экспериментом. При оценке температурного состояния деталей ротора турбины используются коэффициенты теплопроводности, которые были получены в стационарных условиях земного тяготения ($g=1$) на ненагруженных образцах. В реальных условиях рабочие лопатки и диски турбин нагружены растягивающими центробежными силами ($\sigma_p \approx 250 \dots 500$ МПа) и работают при центробежных ускорениях $a = 40000 \dots 200000$ м/с² (4000 ... 20000 g), виброускорениях более 1000 g и высоких температурах газа более 1700...1800 К и изменение температуропроводности материалов в этих условиях можно ожидать существенным. Вероятно, неучет этого обстоятельства приводит к дополнительному различию температурных полей лопаток турбин прогнозируемых расчетом и наблюдаемых в эксперименте.

Данная работа посвящена актуальным проблемам по разработке методов исследований температуропроводности металлических материалов в разных направлениях в поле действия центробежных ускорений и виброускорений с учетом скоростей нагрева и методики по объективной оценке эффективности теплозащиты металла с помощью керамических покрытий при газопламенном нагреве.

С использованием разработанного запатентованного метода получены экспериментальные данные нестационарного нагрева: кривые изменения температур и скоростей нагрева на концах радиального и окружного теплопроводников. Из анализа относительных скоростей нагрева было определено, что температуропроводность в радиальном направлении для радиального теплопроводника возрастает в 2.5, 2.9 и 3.5 раза соответственно на частотах вращения 2500, 5000 и 10000 об/мин, причем в окружном направлении (для окружного теплопроводника) возрастает меньше.

Приведены результаты исследований нестационарного нагрева теплопроводников в поле действия виброускорений при разных амплитудах колебаний на частоте 120 Гц на вибростенде. Из анализа результатов экспериментальных исследований и скоростей нагрева следует, что температуропроводность нике-

левого теплопроводника при виброускорении 120 g возрастает на 50 % по сравнению со статическим состоянием, а время передачи тепла по никелевому и медному теплопроводникам сокращается соответственно в 1.6 и 1.3 раза.

По результатам проведенных исследований было также получено, что температуропроводность металлического стержня из углеродистой стали с учетом влияния ультразвуковых колебаний увеличивается в 2 раза. Новые результаты были также получены с ультразвуковыми преобразователями, работающими на высоких частотах от 2 до 10 МГц. При этом температуропроводность металлического образца увеличивалась на 30-50 %.

В настоящее время в мировой практике широко используются керамические ТЗП на основе ZrO_2 . Вместе с тем, сведения о теплопроводности и температуропроводности и эффективности теплозащиты деталей с помощью ТЗП при нагреве их в газовом потоке весьма ограничены и противоречивы. В данной работе приводится разработанная методика по объективной оценке теплозащиты керамических покрытий при газопламенном нагреве объекта на разработанной установке. Суть данной оригинальной методики, защищенной патентом РФ, состоит в том, что через разъемный образец, собираемый из двух половинок пропускается высокотемпературный газовый поток. Половинка образца, защищенная от продуктов сгорания покрытием, разогревается меньше, чем незащищенная. Разность температур Δt стенок защищенной и незащищенной ТЗП характеризует эффективность и температуропроводность ТЗП. Экспериментальные исследования показали, что эффективность снижения температуры металла при газопламенном нагреве после нанесения ТЗП толщиной $\delta = 120$ мкм по плазменной (ПТ) и электронно-лучевой (ЭЛТ) технологиям составляют: ПТ покрытие - $\Delta t_{\max} = 60-70$ °С; ЭЛТ (столбчатое) покрытие - $\Delta t_{\max} = 100-110$ °С. По полученным результатам можно оценить температуропроводность ЭЛТ керамических покрытий, которая в среднем в 1,6 раза ниже, чем у ПТ покрытий. Таким образом, полученные результаты показывают, что при газопламенном нагреве моделей исследованное ЭЛТ покрытие столбчатой структуры лучше защищает металл, чем испытанное ПТ покрытие. Разработанный оригинальный метод обеспечивает получение более точных данных о теплофизических свойствах керамики в условиях эксплуатации деталей турбин авиационных двигателей.

Полученные результаты необходимо учитывать при работе деталей машин и конструкций в условиях эксплуатации, работающих при высоких центробежных ускорениях, виброускорениях, ультразвуковых колебаниях и высоких температурах.

РАЗРАБОТКА ИНЖЕНЕРНОГО СВОБОДНО РАСПРОСТРАНЯЕМОГО ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГИДРОГАЗОДИНАМИКИ, ТЕПЛООБМЕНА И ХИМИЧЕСКОГО РЕАГИРОВАНИЯ**Дектерев А.А.¹, Литвинцев К.Ю.¹, Гаврилов А.А.¹, Харламов Е.Б.¹**¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Красноярск

E-mail: Sttupick@yandex.ru

Математическое численное моделирование процессов гидродинамики и тепломассопереноса как один из важных инструментов для проведения научных фундаментальных и прикладных исследований, анализа технологических процессов, оптимизации и модернизации технологических комплексов и установок успешно применяется во всем мире, включая РФ. Однако в РФ все еще достаточно низкий уровень использования данного инструмента для модернизации промышленных и инфраструктурных объектов. Это обусловлено несколькими причинами, наиболее значимыми из которых являются финансовые затраты, связанные с владением соответствующего программного обеспечения, и отсутствие достаточного количества квалифицированных специалистов по численному моделированию процессов гидродинамики и тепломассопереноса. Использование наиболее развитых зарубежных программных комплексов ANSYS CFD или STAR-CCM+ требует вложений десятки - сотни тысяч долларов. Единственный российский коммерческий программный CFD комплекс «FlowVision» обладает меньшими функциональными возможностями. Так же в РФ развиваются отраслевые и университетские программы. Наиболее известный из отраслевых программных комплексов – это «LOGOS», ориентированный на задачи военного комплекса и задачи атомной энергетики. На данный момент «LOGOS» является не доступным для общего использования. В качестве примера университетских кодов можно привести, разработанные в Санкт-Петербурге программы «VP-2/3» и «SINF». Особенность университетских кодов, в том, что они предназначены в основном для внутреннего использования. Кроме этого еще существует ряд открытых зарубежных кодов (например, «OpenFoAM»), которые используются российскими исследователями, но их освоение требуют значительно большего времени и более высокой квалификации пользователя.

Таким образом, актуален вопрос создания для научных и образовательных организаций и промышленных предприятий в РФ доступного (свободно распространяемого) полноценного программного комплекса для моделирования задач гидрогазодинамики и тепломассообмена. В Красноярском филиале ИТ СО РАН разрабатывается подобный программный комплекс на базе авторского кода «SigmaFlow» [1].

Программный комплекс состоит из трех основных блоков: подготовка расчета, расчетный модуль, анализ результатов. Блок подготовки расчета включает в себя генератор сетки и модуль задания граничных и начальных условий, теплофизических параметров и параметров математической модели. В генераторе сетки дискретизация расчетной области проводится на основе сторонней (импортируемой) геометрии, предварительно подготовленной во внешней CAD

системе. Для будущей расчетной области строится октодерево с необходимой глубиной разбиения внутри и на границах геометрии. Полученные листовые элементы октодерева определяют узлы будущей сетки. На основе полученного распределения узлов генерируется неструктурированная гибридная сетка, включающая в себе шестигранные элементы и многогранные элементы (пирамиды, призмы, тетраэдры). В расчетном модуле реализованы математические модели, описывающие стационарные и нестационарные ламинарные и турбулентные одно и многокомпонентные дисперсные течения с учетом сопряженного и лучистого теплообмена и гомогенных газофазных химических реакций. Дискретизация уравнений гидродинамики осуществляется методом контрольного объема. Для моделирования турбулентности газовой фазы стационарных и нестационарных течений используется осреднение по Рейнольдсу уравнений Навье—Стокса (RANS). Для замыкания уравнений Рейнольдса применяются модели, как с использованием гипотезы вихревой вязкости, так и на основе уравнений переноса для рейнольдсовых напряжений. Моделирование переноса твердых частиц основано на диффузионно-инерционной модели движения малоинерционных частиц, которая является упрощением двухжидкостной модели дисперсных потоков. Математическая модель переноса излучения основана на методе конечных объемов. Оптические свойства среды описываются WSGG (Weighted Sum of Gray Gas) моделями, обеспечивающие приемлемую точность для большого класса прикладных задач, связанных с сжиганием углеродного топлива. Расчет химической кинетики горения газового топлива основан на использовании глобальных необратимых реакцией между реагентами с образованием продуктов реакции (Eddy brake up model).

Кроме этого расчетный модуль поддерживает многопоточные вычисления. Распараллеливание алгоритмов вычислительной гидродинамики осуществляется посредством декомпозиции расчетной области.

Программный комплекс сопровождается документацией и базой тестовых задач.

1. Дектерев А.А., Гаврилов А.А., Минаков А.В. Современные возможности CFD кода SigmaFlow для решения теплофизических задач // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. 2010. Выпуск 2(4). С. 117-122.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности» в рамках научного проекта № 16-48-242085.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА РЕЖИМЫ СМЕШЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ В Т-ОБРАЗНОМ МИКРОМИКСЕРЕ

Лобасов А.С., Минаков А.В.

¹ Сибирский Федеральный Университет, Красноярск

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

В последнее время в химической промышленности стала активно продвигаться миниатюризация технологических процессов, и микромеханика стала интенсивно развивающейся и перспективной областью исследований. Во многих исследованиях отмечается, что применение микроустройств позволяет значительно интенсифицировать физико-химические процессы по сравнению с классическими крупногабаритными реакторами [1-3]. Можно смело прогнозировать, что уже в самом ближайшем будущем картина в химических лабораториях изменится радикальным образом в сторону значительного улучшения продуктивности и эффективности процессов синтеза при существенной миниатюризации приборов и аппаратов. Контроль давления, температуры, времени реакции и скорости потоков в реакторах с небольшим объемом осуществляется намного проще и эффективнее. Отсюда вытекают основные неоспоримые преимущества микрореакторных микросистем – безопасность проведения сильно экзотермических реакций и работы с токсичными или взрывоопасными реактивами, проведение реакций при сверхкритических условиях, в целом существенно сокращая затраты на исследование, внедрение и масштабирование химических процессов.

Среди всевозможных форм микромиксеров и микрореакторов очень распространены миксеры Т-типа, в которых жидкости поступают в два противоположенных канала (входные каналы), а их смесь вытекает из третьего канала (выходной канал или канал смешения). Они являются наиболее простой в изготовлении и, в то же время, эффективной формой микромиксеров.

В данной работе проведено исследование влияния различных параметров на эффективность смешения, а также режимы течения и смешения жидкостей. В частности, в результате численного исследования было установлено существенное влияние вязкости и плотности смешиваемых жидкостей на картину течения, режимы и эффективность смешения двух жидкостей (см. рис. 1).

Кроме того, было показано наличие существенно-го влияния начальных температур смешиваемых жидкостей (см. рис. 2), а также реологических свойств жидкостей, которые задавались с помощью степенной модели неньютоновской жидкости. После этого были проведены численные исследования смешения жидкостей в Т-образном микромиксере при наличии граничных условий скольжения на стенке, которые задавались модифицированными уравнени-

ями Максвелла-Смолуховского и показано, что результаты значительно отличаются от случая условий прилипания на стенке.

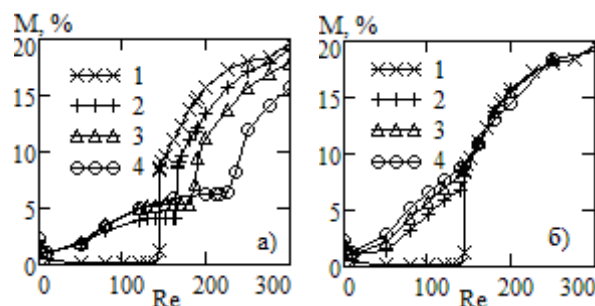


Рис. 1. Зависимость эффективности смешения от числа Рейнольдса при различных вязкостях (а) и плотностях (б), при отношении соответствующих параметров: 1 – 1; 2 – 1,25; 3 – 1,5; 4 – 2.

Для каждой серии расчётов были получены данные о распределении давления, концентрации компонент смеси и полей скоростей в микромиксере, построена зависимость эффективности смешения жидкостей и перепада давлений, а также карта режимов течения и смешения от числа Рейнольдса.

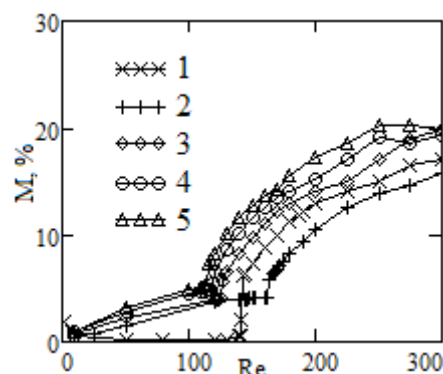


Рис. 2. Зависимость эффективности смешения от числа Рейнольдса при различных разностях начальных температур: 1 – $\Delta t = 0^\circ\text{C}$; 2 – $\Delta t = -10^\circ\text{C}$; 3 – $\Delta t = 10^\circ\text{C}$; 4 – $\Delta t = 20^\circ\text{C}$; 5 – $\Delta t = 30^\circ\text{C}$.

1. Bothe D., Stenich C., Warnecke H. J. Fluid mixing in a T-shaped micro-mixer // Chem. Eng. Sci. 2006. Vol. 61. Pp. 2950-2958.
2. Hoffmann M., Schluter M., Rabiger N. Experimental investigation of liquid-liquid mixing in T-shaped micro-mixers using μ -LIF and μ -PIV // Chem. Eng. Sci. 2006. Vol. 61. Pp. 2968-2976.
3. Dreher S., Kockmann N., Woias P. Characterization of laminar transient flow regimes and mixing in T-shaped micromixers // Heat Transfer Eng. 2009. Vol. 30. Pp. 91-100.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ГОРЕНИЯ В ЗАКРУЧЕННОЙ СТРУЕ ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Лобасов А.С.^{1,2}, Чикишев Л.М.^{1,2}, Дулин В.М.^{1,2}, Маркович Д.М.^{1,2}¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск² Новосибирский государственный университет

E-mail: Alexey.Lobasov@gmail.com

В настоящее время для стабилизации пламени, часто организуют закрутку потока, что позволяет обеспечить устойчивое горение в относительно небольшом объеме, а также способствует достижению хороших характеристик поджига смеси в широком диапазоне рабочих расходов её компонент [1,2]. Методы анемометрии по изображениям частиц (англ.: particle image velocimetry, PIV) и плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции (planar laser-induced fluorescence, PLIF) позволяют получить детальную информацию о вихревых структурах в потоке и их влиянии на тепломассообмен и горение [3,4]. В настоящей работе было проведено экспериментальное исследование данного аспекта при горении метановоздушной смеси в закрученной струе ($Re = 5000$, степень закрутки была равна 1.0 [1]).

Для исследования структуры течения и деформаций фронта пламени были использованы две различные PLIF системы для анализа пространственных распределений гидроксила OH^* и формальдегида $HCHO$ в потоке с горением. Для измерений реализации поля мгновенной скорости был использован метод PIV в стереоскопической конфигурации. PIV система состояла из импульсного Nd:YAG лазера QuantaTel EverGreen 200 (с двумя излучателями, энергия импульсов каждого 200 мДж) и двух ПЗС камер ImperX IGV-B2020 (размер кадра: 2060×2056 пикселей).

В случае измерений распределения радикалов OH^* вторая (532 нм) гармоника импульсного твердотельного Nd:YAG лазера (Quanta-Ray, 10 Гц, 1 Дж) была использована для накачки перестраиваемого лазера на красителях (Sirah, в качестве красителя использовался Rhodamine 6G). Энергия лазерного излучения, в диапазоне длин волн 283-284 нм, составляла 8 мДж. Третья гармоника (355 нм) твердотельного импульсного Nd:YAG лазера (QuantaTel Brilliant B, энергия одного импульса составляла 45 мДж) была использована для возбуждения флуоресценции формальдегида.

Для регистрации сигнала флуоресценции OH^* был использован электронно-оптический преобразователь и усилитель (LaVision IRO) с фотокатодом S20 (multialkali), подключенный к 16-битной камере с гибридной ПЗС-КМОП матрицей (sCMOS) (размер кадра: 2560×2160 пикселей). На фотокатод электронно-оптического преобразователя сигнал PLIF фокусировался кварцевым объективом (LaVision UV-lens, $f\#2.8$, 100 мм). Флуоресценция $HCHO$ фиксировалась второй регистрирующей системой, состоящей из 16-битной интенсифицированной камеры (Princeton instruments PI-MAX4) с аналогичным фотокатодом (размер кадра: 1024×1024 пикселей), оснащенной объективом Sigma AF $\#50$. В обоих случаях, время экспозиции каждого кадра составляло 200 нс. На

объективах были установлены соответствующие полюсно-пропускающие оптические фильтры.

Пучки лазеров были развернуты в коллимированный нож, высотой 50 мм и толщиной менее 0,8 мм. Нож проходил через ось симметрии горелочного устройства. Для различных режимов горения предварительно перемешанной метановоздушной смеси был измерен ансамбль мгновенных реализаций 2D распределений интенсивности флуоресценции и поля скорости. На Рис. 1 представлен пример мгновенной реализации и осредненной по ансамблю интенсивности флуоресценции формальдегида, визуализирующей области локального тепловыделения в результате горения смеси с коэффициентом избытка топлива 0.7. В начальной области закрученной струи формировались вихри, которые деформировали и растягивали фронт пламени, а также способствовали тепломассообмену между продуктами горения в центральной зоне рециркуляции и свежей смесью, поступающей из сопла.

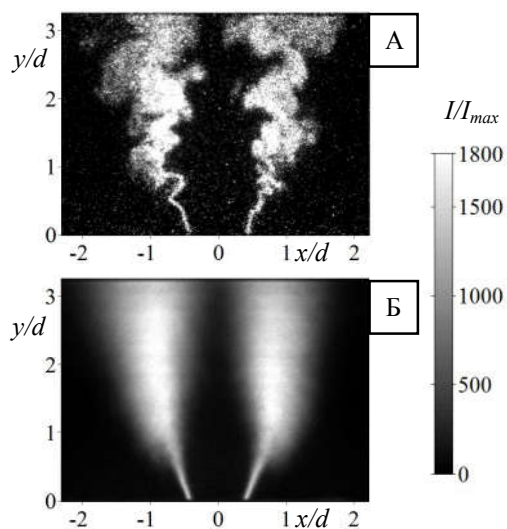


Рис. 1. Мгновенная реализация (а) и осредненная по ансамблю (б) интенсивность флуоресценции формальдегида

1. A. Gupta, D. Lilley, N. Syred. Swirl Flows// Abacus Press, Kent, 1984.
2. R. Weber, J. Dugué. Combustion accelerated swirling flows in high confinements// Progress in Energy and Combustion Science 18, 1992, pp. 349-367.
3. E. P. Hassel and S. Linow. Laser Diagnostics for Studies of Turbulent Combustion// Measurement Science and Technology, Vol. 11, No. 2, 2000, pp. R37-R57.
4. A. C. Eckbreth. Laser Diagnostic for Combustion Temperature and Species// Gordon and Breach, Netherlands, 1996.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ (грант № 16-19-10566).

АНАЛИЗ ГЛУБОКОВОДНЫХ ТЕЧЕНИЙ ЧЕРНОГО МОРЯ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Демышев С.Г.¹, Маркова Н.В.¹

¹ Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь,

E-mail: n.v.markova@mail.ru

В настоящее время знания о поле течений в глубоководных слоях достаточно общие. Они основываются на теоретических выкладках, расчетах скорости – преимущественно динамическим методом, с использованием сведений о температуре и солености морской воды, немногочисленных экспедиционных данных прямых измерений течений, информации о позиционировании всплывающих буев, дрейфующих в Черном море на различных глубинах с начала 2000-х годов, и результатах численного моделирования (к примеру, [1-3]), позволяющих реконструировать полную пространственно-временную структуру поля течений, но требующих верификации натурными данными.

В представленной работе за основу взяты результаты численных экспериментов по расчету поля течений Черного моря с использованием z-координатной нелинейной модели гидродинамики океана Морского гидрофизического института (МГИ) [4], которые дополнены натурными данными из разных источников. Проведено сопоставление:

– модельных трехмерных ежесуточных полей скорости течений, полученных в результате ряда численных экспериментов [3,5] по расчету бассейновой циркуляции Черного моря на основе модели МГИ,

– данных измерений скорости и направления течений в Черном море на глубинах более 300 м (под основным пикноклином) из Банка океанографических данных МГИ (БОД МГИ) [6],

– результатов расчетов лагранжевых скоростей течений на горизонтах 300-1500 м по информации буев Арго [7].

Средние скорости течений в нижнем слое моря меньше поверхностных на порядок, составляя 2-5 см/с, хотя "мгновенные" значения могут достигать достаточно больших величин, сопоставимых со скоростями в стрекне Основного черноморского течения (~10% измерений, согласно БОД МГИ). На стандартном горизонте 1000 м установлено усиление скорости течений по сравнению со значениями на глубине 750 м как по данным БОД МГИ, так и так и

согласно оценке скоростей движения буев Арго на парковочных глубинах.

По результатам численных экспериментов на сетке 5 км с климатическим форсингом и расчетов с разрешением 1,64 км с учетом реального атмосферного воздействия в различных районах Черного моря обнаружены течения антициклонической направленности, в которых скорость имеет величину 3-10 см/с. Как правило, они расположены над свалом глубин под основным пикноклином ниже 1000 м.

1. В.С. Архипкин, А.Н. Косарев, Ф.Н. Гиппиус, Д.И. Мигали. Сезонная изменчивость климатических полей температуры, солености и циркуляции вод Черного и Каспийского морей // Вестник Московского университета. Серия 5 «География». 2013. № 5. С. 33-44.
2. А.Н. Лукьянова, А.В. Багаев, Т.В. Пластун, Н.В. Маркова, В.Б. Залесный, В.А. Иванов. Исследование глубоководной циркуляции Черного моря по результатам численного моделирования и натурным данным: Численные эксперименты на основе модели ИВМ РАН и сравнение с данными Банка данных МГИ РАН // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря: Сб. научн. тр. МГИ РАН, Севастополь. 2016. вып. 3. С. 9-14.
3. Demyshev S.G., Ivanov V.A., Markova N.V. Analysis of the Black Sea climatic fields below the main pycnocline obtained on the basis of assimilation of the archival data on temperature and salinity in the numerical hydrodynamic model // Phys. Oceanogr. 2009. 19, № 1. P. 1-12.
4. Демышев С.Г., Кортаев Г.К. Численная энергосбалансированная модель бароклинных течений океана на сетке C // Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане. М.: ИВМ РАН, 1992. С. 163-231.
5. Дымова О.А. Численный анализ динамики и энергетики мезомасштабных особенностей циркуляции Черного моря: Дис. к.ф.-м. н. Севастополь, 2014. 151 с.
6. Еремеев В.Н., Халиулин А.Х., Ингеров А.В., Жук Е.В., Годин Е.А., Пластун Т.В. Современное состояние Банка океанографических данных МГИ НАН Украины: программно-математическое обеспечение // Морской гидрофизический журнал. 2014. № 2. С. 54-66.
7. Н.В. Маркова, А.В. Багаев. Оценка скоростей глубоководных течений в Черном море по данным дрейфующих буев – профиломеров Арго // Морской гидрофизический журнал. 2016. № 3. С. 26-39.

Работа поддержана РФФИ (грант №15-05-05423 А)

Марфин Е.А.^{1,2}, Абдрашитов А.А.¹, Кравцов Я.И.¹¹ Казанский научный центр РАН, Казань² Казанский (Приволжский) федеральный университет

E-mail: marfin_ea@mail.ru

Процесс добычи углеводородов из недр является одним из самых сложных процессов в природе, освоенных человечеством. Действительно, мы имеем вытеснение одной гетерогенной жидкости другой гетерогенной жидкостью в третьей гетерогенной среде. Учеными и промысловиками разработано огромное количество технологий добычи нефти, среди которых выделяются волновые методы воздействия на пласт. Они не только сами по себе приводят к интенсификации процессов фильтрации жидкости в пористых средах [1], но и при оптимальном совмещении их с другими методами увеличения нефтеотдачи возможно достижение сверхсуммарного эффекта [2]. Несмотря на то, что исследованиями в этой области ученые занимаются более полувека, до сих пор отсутствует четкое представление о механизмах интенсификации упругими колебаниями физических процессов в насыщенных пористых средах.

Скорость фильтрации жидкости в пористой среде согласно закону Дарси определяется градиентом давления, вязкостью жидкости и проницаемостью пористой среды. В обзорной статье [3] рассмотрены различные механизмы изменения под действием колебаний проницаемости геологических сред, происходящие в результате естественных землетрясений и техногенных вибраций, однако многие механизмы, ответственные за изменения проницаемости сред, по мнению авторов, остаются неясными. Настоящая работа посвящена теоретическому выводу математической модели, описывающей проницаемость пористой среды в поле упругих колебаний, характеризуемом амплитудой и частотой наложенных колебаний давления.

В основу математической модели положена следующая гипотеза. Изменение проницаемости пористой среды от начального значения k_0 до значения k_w происходит за счет поглощения энергии звуковой волны. Рассмотрим пористую среду единичного сечения проницаемостью k_0 , через которую за счет перепада давления dp/dx происходит линейная фильтрация жидкости вязкости μ . Мощность затрачиваемой энергии для обеспечения такой равна производству объемного расхода жидкости на перепад давления. В случае волнового воздействия через этот образец будет распространяться затухающая плоская упругая волна. Величина поглощенной звуковой энергии элементом пористой среды толщиной dx зависит от амплитуды колебаний на входе в этот элемент и коэффициентом поглощения α , который в свою очередь зависит от свойств среды (плотности ρ и скорости звука c) и частоты колебаний f . Если в результате волнового воздействия значение проницаемости уменьшается до k_w , то при том же само градиенте давления скорость фильтрации, а, соответственно, и объемный расход жидкости через пористый об-

разец увеличивается. Приравняв разность мощностей энергии, затрачиваемой на преодоление сил фильтрационного сопротивления для k_0 и k_w , мощности энергии поглощенной звуковой энергии в пределе $dx \rightarrow 0$ получено значение относительного коэффициента проницаемости как функции свойств насыщенной пористой среды и параметров волнового воздействия:

$$\frac{k_w}{k_0} = 1 + \frac{\alpha \mu}{\rho c k} \left(\frac{p_w}{dp/dx} \right)^2$$

Анализируя полученное выражение можно сделать вывод о том, что увеличение проницаемости пропорционально коэффициенту поглощения звука и квадрату амплитуды колебаний. Кроме того, при малых градиентах давления, другими словами при низких значениях скорости фильтрации эффект волнового воздействия будет проявляться сильнее. Низкие скорости фильтрации реализуются также при высокой вязкости жидкости и низкой начальной проницаемости пористой среды.

Теоретические данные по полученной модели сравнивались с результатами экспериментальных лабораторных исследований, представленными в работе [4]. Исходные данные физических свойствам исследуемых пористых сред брались из этой работы и справочников. Сопоставление полученных данных свидетельствуют о хорошей сходимости и адекватности разработанной модели наблюдаемого физического явления.

Таким образом, рассмотрено влияние упругих волн на процесс фильтрации жидкости в пористых средах. Показано, что воздействие упругими колебаниями на насыщенную пористую среду приводит к увеличению ее коэффициента проницаемости. Снижение проницаемости в свою очередь позволит повысить скорость течения флюидов в пористых средах и, как следствие, эффективность применяемых методов добычи нефти.

1. Beresnev I.A., Johnson P.A. Elastic-wave stimulation of oil production: A review of methods and results // *Geophysics*. 1994. V. 59. No. 6. P. 1000–1017.
2. Marfin E.A., Kravtsov Y.I., Abdrashitov A.A., Gataullin R.N., Galimzyanova A.R. Elastic-Wave Effect on Oil Production by In Situ Combustion: Field Results. *Petroleum Science and Technology*. 2015. V. 33. No. 15–16. P. 1526–1532.
3. Manga M., Beresnev I., Brodsky E.E., Elkhout J.E., Elsworth D., Ingebritsen S.E., Mays D.C., Wang, C.-Y. Changes in permeability caused by transient stresses: Field observations, experiments, and mechanisms // *Reviews of Geophysics*. 2012. V. 50. No. 2. Paper RG2004.
4. Elkhoury J.E., Niemeijer A., Brodsky E.E., Marone C. Laboratory observations of permeability enhancement by fluid pressure oscillation of in-situ fractured rock // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. Paper B02311.

Работа поддержана РФФИ (грант № 16-29-15118).

Индукционный ВЧ разряд используется во многих приложениях: нанесение покрытий, травление, эмиссионный анализ состава веществ, очистка и обеззараживание.

Для эффективного использования индукционного разряда в целях эмиссионного спектрального анализа необходимо обеспечить наибольшую плотность энергии при минимальном объеме плазмы для достижения максимальной температуры при минимальной затрачиваемой мощности.

Температура индуктивно-связанной плазмы определяется выделяемой в ней электрической мощностью и теплопотерями, которые в свою очередь определяются теплопереносом через поверхность плазмы и конвекцией. Поток тепла через поверхность плазмы пропорционален площади поверхности, соответственно, чтобы уменьшить теплопотери, необходимо уменьшать площадь поверхности.

Классические установки индукционного ВЧ разряда представляют из себя цилиндрические трубки, на внешнюю поверхность которых наматывается спираль индуктора. При этом из-за скин-эффекта энерговыделение происходит в наружном слое плазмы вблизи стенки трубки, о чем говорит распределение температуры по радиусу в объеме плазмы [1]. Внутренний приосевой слой плазмы наименее нагрет и не представляет интереса для возбуждения спектров. В связи с этим возникает идея оптимизировать установку по возбуждению ВЧ индуктивного разряда путем перехода к кольцевой геометрии разрядной трубки.

В случае цилиндрической камеры с диаметром D площадь поверхности плазмы будет определяться как $S_C = \pi D(l + D/2)$, где l – толщина плазменного витка, которая немного больше ширины индуктора (примерно на 10 мм). Для кольцевой камеры площадь поверхности плазменного витка $S_R = \pi^2 Dd$, где D – внешний, а d – внутренний диаметр тора. При $d < (D+2l)/2$ кольцевая геометрия будет более эффективной.

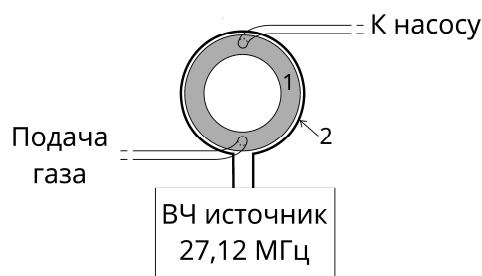


Рис. 1. Схема эксперимента в кольцевой геометрии. 1 – разрядная трубка с плазмой, 2 – индуктор.

Были проведены сравнительные эксперименты с цилиндрической и кольцевой камерой. Схема эксперимента аналогична приведенной в [2]. Вариант с кольцевой камерой изображен на рис. 1, где 1 – кольцевая трубка, 2 – индуктор.

Размеры цилиндрической камеры составляли $D = 45$ мм, $l \approx 20$ мм, для кольцевой камеры $D = 40$ мм, $d = 10$ мм. Таким образом, $S_C = 6$ см², $S_R = 3,8$ см².

В обоих случаях индуктор имел два витка. На индуктор подавался ток от ВЧ источника CESAR 2710 с частотой 27,12 МГц. Выделяемая на нагрузке мощность составляла около 500 Вт. С одной стороны кварцевой трубки устанавливался вакуумный насос, с другой стороны осуществлялась подача плазмообразующего газа через дозирующий клапан. Давление в разрядной трубке контролировалось вакуумметром Testo 552 и составляло 1 мбар. Спектр излучения плазмы регистрировался спектрометром Solar Systems S-150, имеющим спектральный диапазон 180 – 1100 нм и спектральное разрешение 0,3 нм.

В качестве плазмообразующего газа использовались пары воды.

По полученным спектрам определялась температура по методу Больцмана [3]. Для цилиндрической камеры температура составила 4700 ± 300 К, для кольцевой – 5100 ± 300 К. Видно, что температура плазмы в кольцевой геометрии выше, чем в цилиндрической.

Так как в кольцевой геометрии весь тепловой поток проходит через поверхность стеклянной трубки, необходимо отметить, что такая геометрия эффективна только для плазмообразующих газов с теплопроводностью, большей теплопроводности стекла. Для водной плазмы это условие выполняется, а, например, для аргона, у которого теплопроводность на порядок ниже, нет [4]. Поэтому для подбора оптимальной геометрии необходимо учитывать тип используемого газа.

1. С.В. Дресвин, А.А. Бобров, В.М. Лелёвкин и др. ВЧ и СВЧ-плазмотроны. Новосибирск: Наука. 1992. 319 с
2. R.N. Medvedev, D.S. Churkin and I.A. Zarubin. Inductive discharge as a method for direct detection of impurities in water // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 754.
3. В.Н. Колесников. Спектроскопическая диагностика плазмы. М.: МИФИ, 2007. 220 с.
4. Y. Q. Tang and C. Trassy. Inductively coupled plasma: the role of water in axial excitation temperatures // Spectrochimica Acta. 1986. Vol. 41B, Nos 1/2, pp.143-150.

Работа поддержана РФФИ (грант № 16-38-6003).

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ РАБОЧЕГО УЧАСТКА НА ПРОЦЕСС ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ МЕТОДОМ ВЗРЫВНОГО ВСКИПАНИЯ СЖИЖЕННОГО ГИДРАТООБРАЗОВАТЕЛЯ В ОБЪЕМЕ ВОДЫ ПРИ ДЕКОМПРЕССИИ

Мелешкин А.В., Елистратов Д.С., Чернов А.А., Пильник А.А.

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

E-mail: mav@itp.nsc.ru

Были проведены экспериментальные исследования по влиянию температуры рабочего участка на процесс гидратообразования в замкнутой камере при вскипании сжиженного гидратообразующего газа в объеме воды вследствие декомпрессии. Для проведения экспериментальных исследований была модернизирована установка типа «автоклав». Были установлены десять термопар типа «К» по высоте рабочего участка, для более детальной фиксации изменения температуры в происходящем процессе. Установка представляла собой реактор для работы с высокими давлениями до 25 Мпа. Рабочий участок выполнен из нержавеющей стали в виде сосуда диаметром 100 мм и высотой 300 мм, с водяной рубашкой для термостатирования.

Суть эксперимента заключается в следующем. Вода на рабочем участке охлаждалась до рабочей температуры (2 – 8 °С), после чего в камеру подается газ-гидратообразователь (фреон 134а). Давление газа в баллоне (из которого осуществляется подача) существенно превышало давление в камере, а его температура равнялась комнатной. Поступая в камеру, газ нагнетал в ней давление, охлаждался до температуры окружающей среды и сжижался. В результате, скапливался на дне камеры. Далее осуществлялась быстрая декомпрессия рабочего объема (путем стравливания газа), в результате которой сжиженный газ, находящийся под слоем воды, взрывным образом вскипал и интенсивно перемешивался с водой. Это приводило к формированию развитой межфазной поверхности. Пузырьки газа при этом двигались относительно жидкости. Надо отметить, что жидкость вокруг пузырьков сильно охлаждалась (вследствие фазового перехода). Иными словами, среда попадала в фазовую область, где возможно гидратообразование. Все это привело к формированию и росту на поверхности пузырьков гидратных оболочек. Из-за активного кипения, поверхность пузырьков постоянно претерпевает внешние воздействия, в результате чего эти оболочки имеют пористую структуру (либо отслаиваются в виде хлопьев). Следовательно, скорость гидратообразования не лимитируется диффузией, а определяется теплоотдачей, которая в данном случае существенна. Все это приводит к быстрому росту гидратной массы во всем объеме жидкости (рис. 1). Отметим, что

время всего процесса примерно составляет всего несколько десятков секунд.

Определение влияния температуры рабочего участка на гидратообразование выполнялось с помощью проведения следующего исследования. Полученную гидратную массу помещали в открытый сосуд с теплой водой (около +20°С), находящейся на точных весах. Образец начинал разлагаться, высвобождая заключенный в нём газ. Полученные графики изменения массы при дегазации образца, выполненного при различной температуре рабочего участка, сравнивались друг с другом и со льдом, в результате чего была определена оптимальная температуры гидратообразования.



Рис. 1 Полученный в ходе эксперимента газогидрат фреона 134а

Благодарность

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-10025).

Минаков А.В.^{1,2}, Платонов Д.В.^{1,2}, Дектерев Д.А.^{1,2}¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск² Сибирский федеральный университет, КрасноярскE-mail: tov-andrey@yandex.ru

В связи с широким применением гидроэлектростанций (ГЭС) в качестве инструментов регулирования нагрузки в энергосистемах, гидроагрегаты подвержены частым сменам режимов работы. При этом в проточном тракте этих станций развиваются переходные процессы, характеризующиеся сильными нестационарными колебаниями расхода и давления, которые представляют очень серьезную опасность для станции. Кроме того, к переходным процессам относятся такие нештатные режимы работы гидроагрегата, такие как холостой сброс воды через турбину, разгон и торможение агрегата, переход из турбинного в насосный режим для ГАЭС, которые также сопровождаются запредельными уровнями пульсаций потока и вибраций.

Основной целью данной работы является исследование именно холостого пропуска непосредственно через гидроагрегат. Холостой пропуск через агрегат гидротурбины используется при строительстве здания ГЭС или в случае сброса воды и является сложным технологическим процессом. В любом варианте холостого пропуска обтекание основных элементов конструкции проточного тракта будет происходить в нерасчетном режиме и, следовательно, сопровождаться значительным усилением нестационарных процессов и кавитации, что ведет к дополнительному износу и сокращению срока службы агрегата. Поэтому исследование и оптимизация процесса холостого пропуска является актуальной задачей.

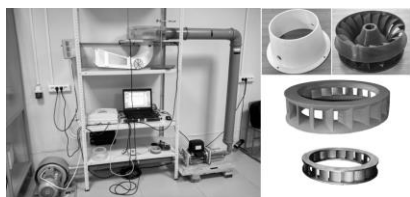


Рис. 1. Фотография аэродинамического стенда СФУ

В данной работе проведен эксперимент на открытом аэродинамическом стенде с радиально осевой турбиной представляющим точную копия действующего гидроагрегата (рис.1) [1].

В рамках работы исследованы три основных варианта холостого пропуска через гидроагрегат: с демонтированным рабочим колесом (рис.2), с заторможенным рабочим колесом (рис.3) и со свободно вращающимся рабочим колесом (рис.4).

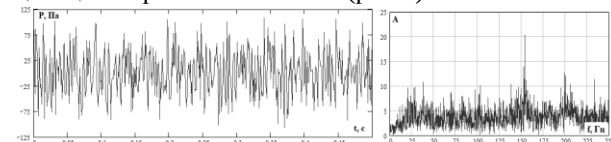


Рис. 2. Пульсации и спектр пульсаций давления с демонтированным колесом.

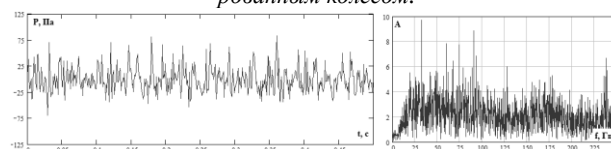


Рис. 3. Пульсации и спектр пульсаций давления с заторможенным колесом.

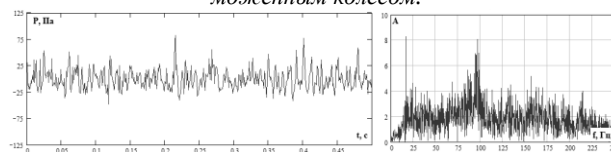


Рис. 4. Пульсации и спектр пульсаций давления со свободно вращающимся колесом.

Основным предметом исследования являлись пульсации давления в проточном тракте, которые генерируются масштабными прецессирующими вихрями образующиеся в нерасчётных режимах под крышкой турбины и в отсасывающей трубе гидроагрегата.

Выполнено при поддержке РФФИ и Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности (16-48-240707 p_a).

1. Platonov D., Minakov A., Dekterev D., Sentyabov A., Dekterev A. Numerical and experimental study of low-frequency pressure pulsations in hydraulic units with Francis turbine, *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 754, Issue 6, 2016.

Мисюра С.Я., Донской И.Г.

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

E-mail: misura@itp.nsc.ru

Газовые гидраты являются твёрдыми кристаллическими соединениями, состоящими из молекул воды и газа, удерживаемые силами Ван-дер Ваальса. В настоящее время открыто и исследовано более 60 видов газовых гидратов. Образование газовых гидратов приводит как к негативным последствиям, так и способствует решению энергетических проблем и развивает альтернативные виды энергии. За последние десятилетия разработаны технологии борьбы с гидратными пробками с применением термодинамических и кинетических ингибиторов [1]. Повышенное внимание уделяется получению и хранению гидратов водорода и углекислого газа. Разрабатываются технологии гидратных батарей [2] для отопления жилых помещений и применение газовых гидратов для биогазовых смесей [3]. Большие усилия направлены на повышение эффективности сжигания гидратов горючих газов [4-5] и получению гидратов аминокислот [6], исследования которых позволили выдвинуть гипотезы о возникновении жизни на Земле.

Моделирование поведения газовых гидратов можно разделить на три группы: 1) описание термодинамического равновесия; 2) кинетика образования и распада при положительных температурах и 3) кинетика диссоциации при отрицательных температурах. Для группы 1 и 2 экспериментальные данные поддаются удовлетворительному описанию. Для отрицательных же температур (группа 3) прогнозирование существенно осложняется и на сегодняшний день используется только качественный анализ диссоциации. Проблема описания в данном случае связана с существенным влиянием морфологии структур на процесс диссоциации. При незначительном изменении давления и температуры, скорость диссоциации может изменяться на 4-5 порядков и при температурах отжига возникает аномально низкая скорость диссоциации [7].

Нами проведены экспериментальные исследования процесса диссоциации искусственных и природных образцов гидрата метана, газовых гидратов в пористой среде, а также гидратов, образующихся во влаге пор угля. Впервые проведено моделирование процесса распада с учётом структурных параметров образцов [8]. Одновременно учитывается внутренняя кинетика, диффузия, фильтрация, нестационарный внешний теплообмен и теплопроводность образца. Задаётся закон изменения плотности пор и толщины корки льда со временем. Моделирование (Рис. 1) удовлетворительно обобщает экспериментальные данные [7] по кинетике диссоциации, а также данные других работ.

Разработанная модель расчёта может эффективно применяться для решения следующих задач: 1) хранение и транспортировка гидратов природных газов. Точное описание процесса диссоциации газовых клатратов позволит повысить эффективность существующих технологий.

2) Повышение точности моделирования и решения задач оптимизации при горении газового гидрата. 3) Предсказание опасных ситуаций (взрыв метана) при скачкообразных выбросах метана в угледобывающих шахтах при распаде гидрата природного газа в порах угля. 4) Развитие моделей глобального потепления климата с учётом распада гидрата природного газа в пористой среде вечной мерзлоты. На сегодняшний день установлено, что освоение северных территорий от вечной мерзлоты происходит с более высокой скоростью, чем прогнозируется, что приводит к большему количеству выделенного в атмосферу метана.

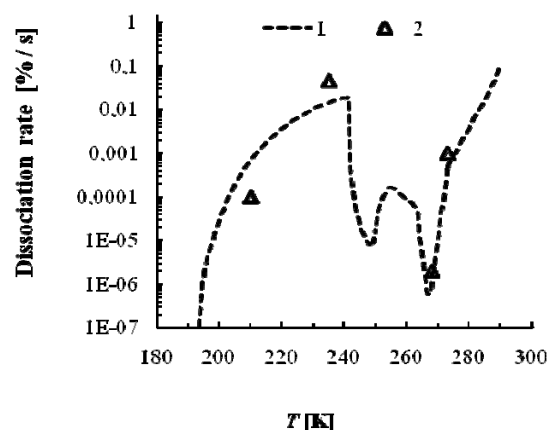


Рис. 1 Изменение скорости диссоциации от $T(K)$: 1-эксперимент [7], 2-моделирование

1. Sloan Jr., Koh C.A. Clathrate hydrates of the natural gases. CRC Press, 2008, Boca Raton, FL.
2. Obara S., Kikuchi Y., Ishikawa K., Kawai M., Yoshiaki K. Development of a compound energy system for cold region houses using small-scale natural gas cogeneration and a gas hydrate battery. *Energy* 2015 (doi:10.1016/j.energy.2015.03.097).
3. Castellani B., Rossi R., Filippini M., Nicolini A. Hydrate-based removal of carbon dioxide and hydrogen sulphide from biogas mixtures: Experimental investigation and energy evaluations. *Biomass & Bioenergy* 2014; 70: 330-338.
4. Nakoryakov V.E., Misyura S.Y. Nonstationary combustion of methane with gas hydrate dissociation. *Energy and Fuels* 2013; 27(11): 7089-7097.
5. Misyura S.Y. Efficiency of methane hydrate combustion for different types of oxidizer flow, *Energy* 103 (2016) 430-439.
6. Sa J.-H. et al. Hydrophobic amino acids as a new class of kinetic inhibitors for gas hydrate formation, *Scientific Report* 3:2428 (2013).
7. Kuhs W.F., Genov G., Staykova D.K., Hansen T. Ice perfection and onset of anomalous preservation of gas hydrates. *Phys.Chem.Chem.Phys.* 6, 4917-4920 (2004).
8. Misyura S.Y., Donskoy I.G. Dissociation of natural and artificial gas hydrate. *Chemical Engineering Science* 148 (2016) 65-77.

This work was carried out at the Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS and financially supported by the Russian Science Foundation (project number 15-19-10025).

Молочников В.М.^{1,2}, Кратиров Д.В.², Михеев А.Н.¹¹ Казанский научный центр РАН² Казанский национальный исследовательский технический университет им.А.Н.Туполева - КАИE-mail: vmolochnikov@mail.ru

Газо- и гидродинамические тракты (каналы) энергетических установок различного назначения представляют собой сложные системы с большим количеством местных сопротивлений (колена и отводы, регулирующая аппаратура, задвижки и т.д.). Наличие этих элементов может оказывать существенное влияние на структуру течения в каналах: вызывать деформацию профиля скорости, закрутку потока, формирование вихревых структур различного масштаба и, соответственно, влиять как на работу отдельных элементов энергетических установок, так и установок в целом.

Чрезвычайно важно иметь возможность оценки и прогнозирования степени воздействия местных сопротивлений на структуру течения еще на стадии проектирования. Использование для этих целей численных методов и пакетов прикладных программ в случае сложной геометрии тракта и большого количества режимов течения требует значительных временных ресурсов и нуждается в тщательном тестировании. Наиболее приемлемым подходом к решению проблемы является использование лабораторного эксперимента. Обширные перспективы применения этого подхода открывают интенсивно развивающиеся оптические полевые методы исследования структуры потока (PIV, PTV, SIV и т.д.), позволяющие измерять мгновенные векторные поля скорости и завихренности и получать на основе этих измерений и данные о структуре течения и ее эволюции. В основе этих методов лежит фото или видеосъемка движения трассеров, засеиваемых в поток, в световом ноже, создаваемом импульсным или непрерывным лазером, с последующей кадровой обработкой изображений. Однако до сих пор не решена проблема применения таких методов для оценки структуры потока в каналах с криволинейной формой поперечного сечения, в частности, в круглых трубах, где наибольшая погрешность оценки векторов скорости потока имеет место в одной из самых важных областей – вблизи стенки канала. Для решения этой проблемы предлагается использовать специальное устройство, представляющее собой аналог камеры Эйфеля (рис.1). Камера снабжена подводным 1 и отводящим 2 фланцами. В верхней части камеры расположено окно 3, закрытое стеклом. В обечайке 4 камеры выполнен светопрозрачный паз 5 для обеспечения возможности создания в исследуемой области течения светового ножа. Напротив паза 5 расположено улавливающее устройство, предотвращающее отражение лазерного луча в область течения. К фланцу 1 крепится трубопровод с исследуемым местным сопротивлением. Камера позволяет проводить исследования на трубопроводах с диаметром проходного сечения $Dy = 50 - 300$ мм.

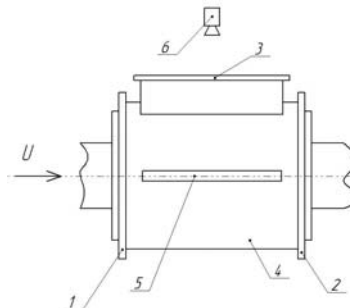


Рис.1. Схема камеры Эйфеля

Для использования полевых методов (PIV, SIV) исследования структуры потока он предварительно засеивается специальными трассерами. Давление в камере Эйфеля соответствует давлению в потоке за исследуемым местным сопротивлением, поэтому за входным сечением камеры не происходит сколько-нибудь существенного расширения струи, формируемой в камере Эйфеля. По этой причине структура потока за местным сопротивлением, будет соответствовать структуре течения в струе. Таким образом, использование камеры Эйфеля позволяет проводить исследования структуры потока за местными сопротивлениями в каналах круглого поперечного сечения, в том числе в непосредственной близости от стенки канала.

С использованием метода SIV [1] выполнено тестирование камеры Эйфеля на примере измерения профиля скорости и ее турбулентных пульсаций в полностью развитом турбулентном течении в круглой трубе. Проведены исследования структуры потока за местным сопротивлением в виде имитатора шиберной задвижки с различной степенью перекрытия потока: 25, 50 и 75% (рис.2).

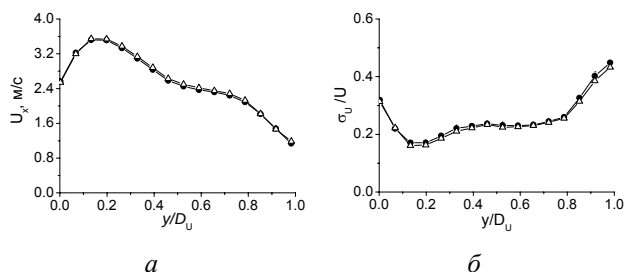


Рис.2. Профиль скорости (а) и ее турбулентных пульсаций за задвижкой с перекрытием 50%.

Список литературы

1. Михеев Н.И., Душин Н.С. Метод измерения динамики векторных полей скорости турбулентного потока по видеосъемке дымовой визуализации // Приборы и техника эксперимента. 2016. №6. С. 114-122.

Михеев Н.И.^{1,2}, Душин Н.С.¹, Саушин И.И.¹¹ Казанский научный центр РАН² Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ

E-mail: n.miheev@mail.ru

Не так давно появилась техника измерений Smoke ImageVelocity (SIV) [1], главным отличием которой от классического PIV [2-4] является использование в качестве трассеров не отдельных частиц, а дыма с непрерывным распределением яркости на изображении. Благодаря лучшей отражающей способности дыма удается получать хорошее пространственное и временное разрешение при использовании сравнительно простых аппаратных средств - камеры и лазера. При SIV-измерениях достаточно просто измерить динамику векторных полей скорости потока с частотой свыше 10 кГц, что открывает новые возможности исследования нестационарных процессов.

Алгоритм определения динамики векторного поля скорости по результатам дымовой визуализации во многом схож с алгоритмами, применяемыми в PIV. В окрестности узлов сетки (рис.1) выделяется исходный фрагмент изображения с размерами N_x и N_y пикселей. Затем каждый исходный фрагмент на кадре k сравнивается с фрагментами такой же формы и размеров, расположенными на кадре $k+1$ в окрестности того же узла расчетной сетки. Однако сходство между фрагментами определяется не по кросскорреляционной функции, а по величине функционала:

$$\Phi_{\Delta i, \Delta j} = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} |I_{k,i,j} - I_{k+1,i+\Delta i,j+\Delta j}|.$$

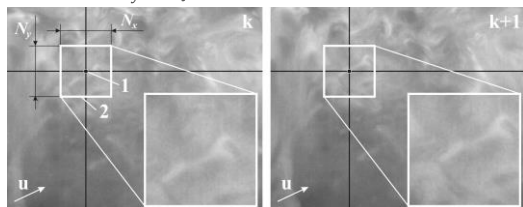


Рис. 1. Схема определения смещения фрагмента: 1 – узел расчетной сетки; 2 – исходный фрагмент

Оценка точности предлагаемой техники измерений оценивалась как с использованием сгенерированных синтетических изображений, так и сравнением с литературными данными для типовых течений. Пример такого сравнения показан на рис.2. Если техника генерации изображений для PIV основана на моделировании распределения в потоке и яркости отдельных частиц [2], то для SIV моделировалось непрерывное поле яркости на основе методов моделирования случайных полей скалярных величин. Предварительно были обобщены данные по пространственным корреляциям яркости дыма, используемые при моделировании. Оказалось, что при нормировании корреляционной функции по интегральному пространственному масштабу корреляционная функция яркости в турбулентных потоках оказалась универсальной. Установлено, что предложенная техника по сравнению с PIV лучше адаптирована к вы-

сокой концентрации трассеров и большим смещениям фрагментов дыма между соседними кадрами, вплоть до смещения на половину размера самого фрагмента. Более высокая информативность изображения позволяет оценивать вектор скорости по фрагменту изображения меньших размеров, что благоприятно сказывается на возможностях измерений мелкомасштабной турбулентности.

С использованием SIV выполнены исследования стационарных и нестационарных, безотрывных и отрывных течений. Для этих течений получены частотные спектры турбулентных пульсаций двух компонент скорости потока, профили генерации и диссипации турбулентности, моментов высших порядков флуктуаций скорости и их производных. Получены новые данные по структуре потока и характеристикам турбулентности, в том числе при высокочастотных вынужденных колебаниях скорости потока в каналах.

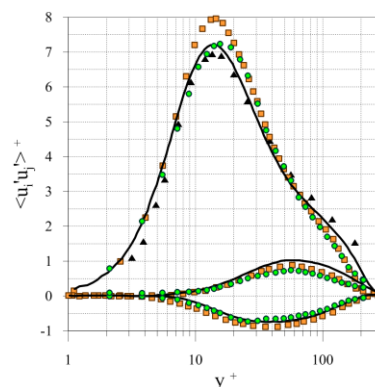


Рис. 2. Профили пульсаций $\langle u'v'u'v' \rangle^+$ в развитом турбулентном пограничном слое; — DNS ($Re_\tau=255$; Schlatter et al. 2009); ▲ – термоанемометр ($Re_\theta=502$; Roach, 1989) ■ – PIV ($Re_\theta=518$; Willert 2015); ● – SIV ($Re_\theta=425$)

Показано, что техника SIV существенно расширяет возможности экспериментального исследования турбулентности и структуры течения в быстропотекающих процессах.

1. N. I. Mikheev and N. S. Dushin. A Method for Measuring the Dynamics of Velocity Vector Fields in a Turbulent Flow Using Smoke Image-Visualization Vide // Instruments and Experimental Techniques, 2016, Vol. 59, No. 6, pp. 880–887.
2. M. Raffel, C. Willert, J. Kompenhans. Particle Image Velocimetry. A Practical Guide. – Germany: Springer, 1998. – 448 p.
3. М.П. Токарев, Д.М. Маркович, А.В. Бильский. Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скорости // Вычислительные технологии. – 2007. – Т. 12. – №3. – С. 109–131.
4. J. Westerweel, G.E. Elsinga, R.J. Adrian. Particle image velocimetry for complex and turbulent flow // Annual Review of Fluid Mechanics. – 2013. – Vol. 45. – P. 409–436.

Работа поддержана РНФ (проект № 16-19-10336).

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВКИ НАНОЧАСТИЦ НА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БУРОВЫХ РАСТВОРОВ

Михиенкова Е.И., Неверов А.Л., Матвеев А.В., Жигарев В.А., Кудрявцев И.В.

Сибирский Федеральный Университет

E-mail: mihienkova_evgeniya@mail.ru

В настоящее время активно исследуется возможность управления свойствами буровых растворов с помощью добавки в них наночастиц различного размера и состава. В ряде работ показано существенное влияние использования добавок наночастиц в буровые растворы для улучшения их свойств. Так, в частности, в работах [1, 2] отмечается, что с помощью незначительных добавок наночастиц можно значительно улучшить реологические свойства буровых растворов, увеличить фильтрационные потери и проницаемость пласта, уменьшить фрикционные потери. В то же время в других работах, напротив, показано, что наночастицы существенно снижают проницаемость горной породы путем формирования на ее поверхности плохо проницаемой корки [3], тем самым уменьшаются фильтрационные потери. Однако, несмотря на большое количество работ в данной области, имеющиеся на сегодняшний день экспериментальные данные являются разрозненными и зачастую противоречивыми. Поэтому необходимы дальнейшие систематические экспериментальные исследования.

В нашей работе проведен цикл экспериментальных исследований свойств буровых растворов, модифицированных наночастицами оксида кремния.

В работе исследовались фильтрационные свойства буровых растворов на стандартных бумажных фильтрах и керамических фильтрах, имитирующих горную породу (керна). Кроме того, были проведены измерения реологических свойств рассматриваемых растворов, выполнены измерения проницаемости кернов после фильтрации, выполнены измерения коэффициента трения скольжения.

В качестве базового применялся глинистый буровой раствор на водной основе. Массовая концентрация глины 5,3%. Массовая концентрация наночастиц варьировалась в диапазоне от 0,25 до 2%. Было рассмотрено два средних размера наночастиц: 10 и 100 нм.

Реология растворов исследована на вискозиметре OFITE 900. Показано, что при добавлении 2% по массе наночастиц показатель степенной модели бурового раствора меняется с $n=0,6$ до $0,25$ относительно базового раствора. Структурная вязкость при этом возросла с $K=0,07$ до $K=1,3$.

Измерения трения скольжения, выполненные на цифровом тестере предельного давления и смазывающей способности OFITE 111-00-1, показали, что добавка наночастиц незначительно (на 4,5%) снижает трение скольжения.

Исследования фильтрации проводились на модели, в которой в качестве пористой среды выступал бумажный (фильтр-пресс 6-секционный 140-50 OFITE) и песчаный (фильтр-пресс НТНР) фильтры со

средним размером пор 3 и 35 мкм. В результате экспериментов измерялся объем отфильтровавшейся жидкости через заданные промежутки времени при постоянном давлении.

Типичные результаты эксперимента по фильтрации бурового раствора с наночастицами приведены на рисунке 1. Эти результаты получены на бумажном фильтре за 30 минут при давлении 7 бар. Видно, что в данном случае добавка наночастиц со средним размером 10 нм приводит к росту фильтрационных потерь примерно в 1,6 раз. Кроме того, было показано, что фильтрационные потери существенно зависят от размера наночастиц. Как видно из графика, частицы со средним размером 100 нм практически не влияют на фильтрацию буровых растворов. Аналогичные результаты были получены и на песчаных фильтрах. Зависимость фильтрационных свойств от размера частиц может являться причиной наблюдающихся расхождений у различных авторов и требует дальнейших исследований.

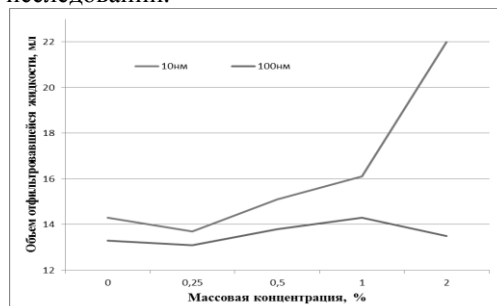


Рис. 1 – Фильтрация бурового раствора на водной основе с добавлением наночастиц SiO₂

Список литературы

1. Dodson T. Identifying NPT Risk. In: Proceedings of the Atlaneic Communication Drilling and Completing Trouble Zones Forum, Galveston, Texas, USA, 2010. Keynote presentation.
2. Riveland F.A. Investigation of Nanoparticles for Enhanced Filtration Properties of Drilling Fluid. MsSci. Thesis. Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology, 2013, 79p.
3. Влияние наполнителей на проницаемость призабойной зоны пласта / Н.М. Уляшева [и др.] // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М., 2012. – № 5. – С. 29–32.

работа выполнена при финансовой поддержке фонда РФФ (грант № 17-79-20218).

Исследование выполнено при поддержке краевого государственного автономного учреждения «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности» в рамках реализации проекта «Конкурс по организации участия студентов, аспирантов и молодых ученых в конференциях, научных мероприятиях и стажировках»: Всероссийская научная конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика» с элементами школы молодых ученых, 2017г.

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА СМЕСИ НА МИНИМАЛЬНУЮ ЭНЕРГИЮ ИСКРОВОГО ЗАЖИГАНИЯ АЭРОВЗВЕСИ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ

Крайнов А.Ю., Моисеева К.М.

Томский государственный университет, Томск

E-mail: Moiseeva_KM@t-sk.ru

В работе на основе математических постановок [1 – 3] с использованием экспериментальных данных [4 – 5] решена задача об искровом зажигании взвеси угольной пыли в воздухе. При решении задачи учитывается влияние теплового и динамического взаимодействия между частицами и газом. Целью работы является определение влияния состава смеси на величину минимальной энергии искрового зажигания.

Математическая постановка задачи формулируется при следующих допущениях. Предполагается, что по объему равномерно распределена взвесь угольной пыли с массовой концентрацией m_{dust} . Нитевидный мгновенный источник зажигания расположен в центре. Внешняя граница расчетной области полагалась бесконечно удаленной от источника зажигания. Взаимодействием между фракциями угольной пыли и потерями тепла на электроды пренебрегалось. Прочие допущения соответствовали [6].

Математическая модель основана на двухфазной двухскоростной модели реагирующей газодисперсной среды и определяется уравнениями энергии и сохранения импульса для газа и частиц; баланса массы кислорода и частиц; неразрывности и состояния для газа; изменения счетной концентрации и радиуса частиц.

Метод решения системы уравнений математической модели представлен в [6]. Шаг по пространству в области источника зажигания задавался равным $\Delta h_{const} = 10^{-6}$ м. После координаты $r = 10^{-3}$ м шаг по пространству увеличивался по правилу $\Delta h_{i+1} = 1.02 \cdot \Delta h_i$. Шаг по времени определялся из условий устойчивости Куранта.

Решение задачи выполнено при теплофизических и кинетических параметрах [4, 6]. Согласно [7] в шахтных условиях в воздухе из-за потока вентиляционного воздуха витают в основном мелкодисперсные частицы, с радиусом меньше или порядка 10^{-6} м. В настоящей работе размер частиц угольной пыли варьировался в диапазоне $r_k = 10^{-8} \div 2 \cdot 10^{-6}$ м, также варьировалось число фракций угольной пыли и процентное соотношение между массами фракций. Целью расчетов для каждого из составов являлось определение минимальной энергии искрового разряда Q_z , при которой формируется и распространяется фронт горения.

На рис. 1 представлена зависимость минимальной энергии искрового зажигания бидисперсной аэровзвеси угольной пыли с размером частиц $2 \cdot 10^{-6}$ и $2 \cdot 10^{-7}$ м от процентного соотношения между массами частиц. Общая масса смеси полагалась равной 0.4 кг/м^3 . На рис. 1 значение 0 % по оси абсцисс определяет монодисперсную взвесь, содержащую только частицы радиуса $2 \cdot 10^{-6}$ м. Значение 100 % определяет монодисперсную взвесь, в которой содержатся только частицы радиуса $2 \cdot 10^{-7}$ м. Результа-

ты представлены в размерности Дж/м. Для того, чтобы определить энергию искрового разряда в Дж, необходимо домножить полученный результат на межэлектродное расстояние ($4 \cdot 10^{-3} - 6 \cdot 10^{-3}$ м по данным [5]).

Согласно рис. 1 при одной и той же массе частиц угольной пыли меньшую энергию искрового зажигания имеет смесь с более мелкими частицами. Чем больше крупных частиц в составе смеси, тем выше минимальная энергия искрового зажигания.

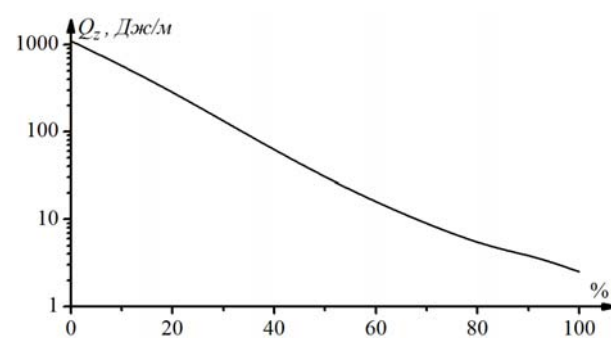


Рис. 1. $m_{dust} = 0.4 \text{ кг/м}^3$, $r_{k,1} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, $r_{k,2} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ м}$

Была выполнена серия расчетов с варьированием размеров частиц и процентного соотношения между фракциями бидисперсной взвеси угольной пыли. Определено, что с увеличением размера частиц и/или с увеличением количества крупных частиц в смеси минимальная энергия искрового зажигания существенно возрастает.

Также были проведены расчеты искрового зажигания полидисперсной аэровзвеси угольной пыли с функцией распределения частиц по размерам из [7].

1. Крайнов А.Ю., Баймлер В.А. Критические условия воспламенения искрой смеси газообразных окислителя и горючего с реагирующими частицами // ФГВ. 2002. Т. 38, № 3. С. 30-36.
2. Крайнов А. Ю. Моделирование распространения пламени в смеси горючих газов и частиц // ФГВ. 2000. Т. 36, № 2. С. 3-9.
3. Крайнов А.Ю., Баймлер В.А. Влияние термического расширения на минимальную энергию искрового зажигания газа // ФГВ. 2002. Т.38, №4. С.9-13.
4. Померанцев В. В., Арефьев К. М., Ахмедов Д. Б. и др. Основы практической теории горения: Учебное пособие для вузов/ под ред. В. В. Померанцева. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986.
5. Корольченко А.Я. Пожаровзрывобезопасность промышленной пыли. М.: Химия, 1986.
6. Krainov A. Yu. Moiseeva K. M. Modeling of the flame propagation in coal-dust- methane air mixture in an enclosed sphere volume // JPCS. 2016. V. 754, 052003.
7. Васильев А. А., Пинаев А. В., Трубицын А. А. и др. Что горит в шахте: метан или угольная пыль? // ФГВ. 2017. Т. 53, № 1. С. 11-18.

Работа поддержана РФФИ (грант 16-33-60091 мол_а_дк).

ТРЕХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ПУНКТОВ ГЛУБИННОГО ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ**Моисеенко Е. В.¹, Дробышевский Н. И.¹, Токарев Ю. Н.¹, Бутов Р. А.¹**¹ Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

E-mail: moi@ibrae.ac.ru

В связи с ростом количества высокоактивных отходов (ВАО) и отработанного ядерного топлива (ОЯТ) возникает необходимость в их утилизации. Наиболее перспективным подходом к утилизации ОЯТ и ВАО в настоящее время считается их глубинное захоронение. Проекты пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО) разной степени проработанности имеются в Финляндии, Швеции, США, Бельгии, Франции и ряде других стран [1].

В ПГЗРО ВАО и ОЯТ отделяются от окружающей среды защитными барьерами - бидонами, пеналами и контейнерами, которые должны сохранить целостность в течение длительного времени – по крайней мере, нескольких сотен лет.

ВАО и ОЯТ обладают высоким тепловыделением, что приводит к необходимости эффективного отвода тепла от ПГЗРО, поскольку при высоких температурах снижается коррозионная стойкость защитных барьеров и ухудшаются их прочностные характеристики. Вследствие этого обеспечение приемлемого теплового режима становится одной из основных задач при проектировании ПГЗРО.

В России планируется строительство ПГЗРО для остеклованных ВАО, а также долгоживущих радиоактивных отходов [2]. На основании этих данных, включая сведения об окружающих горных породах, нами проведены предварительные расчёты теплового режима модельной загрузки ПГЗРО, а также его эволюции вплоть до 10 000 лет.

Для моделирования использовалось разработанное нами программное средство – расчётный код FENIA (Finite Element Nonlinear Incremental Analysis). Этот код предназначен для сопряжённого трёхмерного конечноэлементного моделирования теплофизических и термомеханических процессов в сложных трёхмерных структурах. В дальнейшем планируется внедрение в код теплогидравлических моделей для повышения точности расчёта теплопередачи в насыщенных водой горных породах. Таким образом, будет достигнуто полное сопряжение тепловых, механических и гидравлических моделей (THM coupling). Необходимость такого сопряжения следует из тесной взаимосвязи этих процессов, продемонстрированной, в частности, в серии проектов DECOVALEX [3].

В настоящей работе рассматривается только решение тепловой задачи. При расчете теплового режима решается нестационарное неоднородное уравнение теплопроводности с коэффициентами, являющимися функциями пространственных координат, времени и температуры.

Была проведена верификация расчётного кода на ряде аналитических задач, при этом было получено хорошее совпадение численного и аналитического решений. К сожалению, в настоящее время количе-

ство доступных результатов экспериментальных программ, реализованных в подземных исследовательских лабораториях (ПИЛ), крайне ограничено, поэтому валидация кода на крупномасштабных экспериментах в реальных массивах горных пород пока не проводилась. Планируется проведение нескольких расчётов при получении достаточных сведений об иностранных экспериментах, а полномасштабная валидация будет осуществляться с использованием результатов экспериментов в российской ПИЛ, сооружение которой планируется в ближайшее время в том же районе, где предполагается строительство ПГЗРО.

Была создана детальная сетка для одной скважины, содержащей контейнеры с ВАО, и проведён расчёт теплового состояния окружающих пород в предположении отсутствия стока тепла в горизонтальном направлении. Это предположение соответствует случаю скважины, расположенной внутри хранилища, окружённой скважинами с таким же тепловыделением. Результаты этого расчёта использовались в качестве эталонных для сравнения с полученными на более грубых сетках.

Затем была построена более грубая сетка, описывающая ПГЗРО в целом, и проведён тестовый расчёт с одновременным началом тепловыделения во всех скважинах («мгновенная» загрузка ВАО). Сравнение результатов для внутренних скважин с эталонным решением показало хорошее совпадение.

После этого были проведены расчёты для постепенного заполнения ПГЗРО в течение нескольких десятков лет. Они показали, что постепенный прогрев окружающих пород приведёт к росту температуры, которая к 40-50 годам с начала загрузки достигнет максимальных значений вблизи контейнеров с ВАО. Впоследствии вместе со спадом остаточного тепловыделения в ВАО температура будет понижаться и примерно через 3500 лет вернётся к исходным значениям. Изменение температуры вблизи поверхности земли будет пренебрежимо мало в течение всего времени эксплуатации ПГЗРО. Следует отметить, что эти расчёты являются предварительными, и результаты могут измениться после уточнения тепловыделения ВАО и свойств горных пород при переходе от модельных постановок к проектным задачам.

1. Н. С. Цебаковская и др. Обзор зарубежных практик захоронения ОЯТ и РАО. – М.: Издательство «Комтехпринт», 2015. – 208 с.
2. Андерсон Е. Б. и др. Подземная изоляция радиоактивных отходов / Под ред. В. Н. Морозова. – М.: Издательство «Горная книга», 2011. – 592 с.
3. M. Chijimatsu, et al. Numerical study of the THM effects on the near-field safety of a hypothetical nuclear waste repository-BMT1 of the DECOVALEX III project. Part 1: Conceptualization and characterization of the problems and summary of results. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2005, 42 (2005), pp.720-730.

ФОРМИРОВАНИЕ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР ЗА ПРЕПЯТСТВИЕМ В КАНАЛЕ НА РЕЖИМАХ ПЕРЕХОДА К ТУРБУЛЕНТНОСТИ В СТАЦИОНАРНОМ И ПУЛЬСИРУЮЩЕМ ПОТОКАХ

Молочников В.М.¹, Калинин Е.И.², Мазо А.Б.², Малюков А.В.¹, Охотников Д.И.², Душина О.А.¹

¹ Казанский научный центр РАН

² Казанский (Приволжский) федеральный университет

Е-mail: vmolochnikov@mail.ru

При отрыве потока за препятствием при низких числах Рейнольдса в сдвиговом слое формируются квазипериодические крупномасштабные вихри. Механизм их образования хорошо изучен для неограниченного внешнего потока. Особенности отрыва потока за препятствием в канале обусловлены ограниченностью течения по его ширине. При обтекании обратного уступа обнаружено спиралевидное движение жидкости от боковых стенок канала к его плоскости симметрии, установлено влияние степени расширения канала на это движение. Однако механизм формирования вихрей за препятствием в канале и роль спиралевидного движения жидкости в этом процессе не изучена. Квазипериодичность образования вихрей за препятствием открывает возможность управления теплообменом в отрывной области путем воздействия на течение вынужденными пульсациями потока.

В настоящей работе выполнены экспериментальные исследования и прямое численное моделирование течения за препятствиями в канале на стационарном режиме течения. В качестве препятствия рассматривался поперечный полуцилиндрический выступ, установленный на стенке канала, и поперечный круговой цилиндр при наличии зазора между цилиндром и стенкой. Для поперечного выступа проведены также исследования и в пульсирующем потоке. Основное внимание в этих исследованиях уделено влиянию числа Рейнольдса и параметров вынужденной нестационарности на структуру вихревого течения в отрывной области за выступом. Эксперименты проводились в прямоугольном канале высотой 20 и шириной 50 мм. Полуцилиндрический выступ высотой $h = 3$ мм (радиусом $R = h$) или цилиндр диаметром $d = 3$ мм располагались на расстоянии 106 мм от входа в канал. Расстояние от оси цилиндра до стенки канала составляло h . Число Рейнольдса, вычисленное по высоте препятствия (диаметру цилиндра), изменялось в диапазоне $Re = 69 - 520$. При исследовании обтекания выступа пульсирующим потоком число Струхала при каждом Re изменялось от 0,07 до 0,44, а относительная амплитуда пульсаций – от 0,07 до 0,3. Проводилась визуализация течения и SIV измерения полей скорости потока.

Прямое численное моделирование выполнялось с использованием решателя Ansys Fluent 14.5. Показано хорошее соответствие результатов расчета с данными визуализации течения и SIV – измерениями. Установлено, что наличие боковых стенок канала приводит к формированию непосредственно за выступом пары симметричных угловых вихрей, включающих спиралевидное движение жидкости от бо-

вых стенок к центру канала (рис.1,а). При достижении критического числа Рейнольдса энергия циркуляции жидкости, накапливаемая в замкнутой отрывной области, превышает энергию, отводимую от её границы во внешний поток за счет вязкости. Течение в отрывной области в зоне положительного градиента давления теряет устойчивость, за выступом формируются трехмерные вихревые ступки, локализованные вблизи плоскости симметрии канала. Эти вихри периодически выносятся из рециркуляционной области во внешний поток. С ростом Re масштаб угловых вихрей уменьшается, а начало формирования вихревых ступок смещается в сторону выступа. Процесс сопровождается дроблением крупных вихрей на более мелкие, усиливаются пульсации потока, течение в следе за препятствием ниже линии присоединения приобретает черты турбулентного режима.

В отличие от обтекания поперечного выступа, расположенного на стенке канала, при поперечном обтекании цилиндра, расположенного вблизи стенки, формирование спиралевидного движения жидкости от боковых стенок канала к его плоскости симметрии не наблюдается. Переход к турбулентному режиму течения за цилиндром при достижении критического числа Re происходит вследствие потери устойчивости сдвигового слоя, при этом структура течения в следе становится существенно трехмерной. Таким образом, установлено, что механизм спиралевидного движения при обтекании выступа заключается в особенности течения в угловых конфигурациях канала.

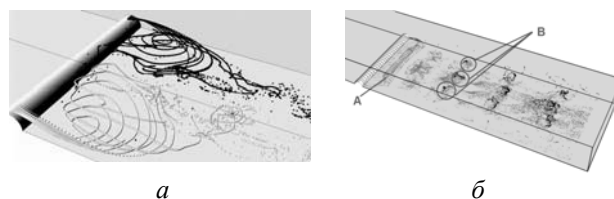


Рис.1. Формирование вихрей за выступом: а – стационарный поток; б – пульсирующий поток. А – разгонный вихрь; В – трехмерные вихри

Показано, что спиралевидное движение жидкости от боковых стенок канала в пульсирующем потоке не достигает плоскости симметрии канала (рис.1,б). Разгонные вихри на начальной стадии формирования имеют цилиндрическую форму. С ростом числа Рейнольдса область спиралевидного движения жидкости уменьшается. Аналогичное влияние на структуру течения оказывает увеличение частоты вынужденных пульсаций потока. После отрыва разгонный вихрь разбивается на несколько трехмерных вихревых ступок, количество которых увеличивается с ростом числа Рейнольдса и частоты пульсаций.

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ МАССОПЕРЕНОСА НА НАКОПЛЕНИЕ И КРИСТАЛЛИЗАЦИЮ БОРНОЙ КИСЛОТЫ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ ВВЭР В СЛУЧАЕ АВАРИИ

Морозов А.В., Питык А.В., Рагулин С.В., Сахипгареев А.Р., Сошкина А.С., Шлепкин А.С.

АО «ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского», Обнинск

E-mail: sas@ippe.ru

Исследование процессов накопления и кристаллизации борной кислоты в активной зоне реакторов ВВЭР нового поколения приобретает особую актуальность в связи с современными требованиями к обеспечению охлаждения активной зоны в течение длительного времени за счет работы пассивных систем безопасности [1]. В рамках реализации проекта реакторной установки ВВЭР-ТОИ особое внимание уделяется обеспечению безопасности реактора при запроектных авариях с разрывом главного циркуляционного контура и потерей всех источников переменного тока в течение 72 ч. Эта задача решается за счет функционирования пассивных систем безопасности, которые обеспечивают охлаждение активной зоны (АЗ) за счет последовательной подачи в реактор раствора борной кислоты с концентрацией 16 г/кг из систем гидроёмкостей первой, второй и третьей ступеней (ГЕ-1, ГЕ-2, ГЕ-3) (рис. 1).

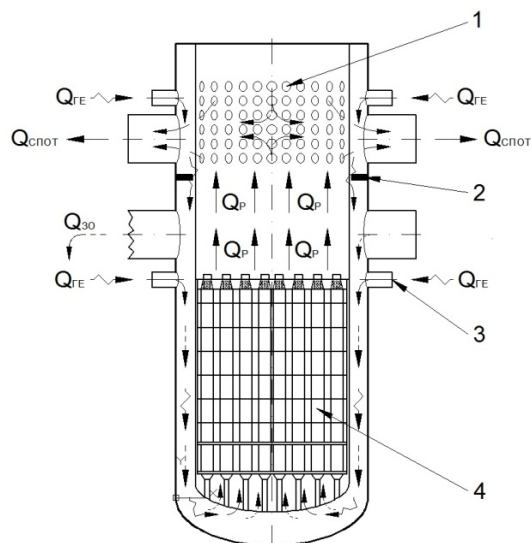


Рис. 1. Массоперенос борной кислоты в РУ ВВЭР при авариях с разрывом главного циркуляционного трубопровода: 1 – перфорация шахты реактора; 2 – раздельный бурт; 3 – патрубков системы аварийного охлаждения зоны; 4 – активная зона; → – поток пара, ← – поток конденсата; ↗ – поступление раствора борной кислоты из систем гидроёмкостей; Q_P – тепловая энергия, выделяющаяся в реакторе; Q_{ZO} – энергия поступающего из течи в объём защитной оболочки пара; $Q_{ГЕ}$ – доля энергии, отводимая жидкостью из гидроёмкостей; $Q_{СПОТ}$ – часть тепловой энергии, уходящая с паром на конденсацию в парогенератор за счет теплообмена в СПОТ.

Как известно, активная зона в это время находится в состоянии кипения, соответственно, учитывая малую концентрацию кислоты в паровой фазе, возможно увеличение количества борной кислоты в теплоносителе активной зоны и достижение условий её кристаллизации на наружной поверхности твэлов,

что может привести к ухудшению теплоотвода. Предельная концентрация раствора борной кислоты, соответствующая началу кристаллизации, зависит от температуры [2]. Для оценки возможности этого процесса в активной зоне ВВЭР был проведен оценочный расчет накопления борной кислоты в реакторе в аварийном режиме. При проведении расчета были сделаны следующие консервативные допущения: борная кислота рассматривается как единственная форма накопления бора, унос борной кислоты за счет растворимости в паре отсутствует.

В данном расчете рассматривались два этапа аварийного процесса. На первом – расход раствора борной кислоты из гидроёмкостей был достаточно велик, что приводило к переливу жидкости и выходу ее через разрыв в пространство защитной оболочки. На втором этапе выход борной кислоты из активной зоны осуществлялся только за счет процессов капельного уноса.

Величина капельного уноса борной кислоты из АЗ вычислялась по известным зависимостям. Расчет был проведен для давления в активной зоне $P=0,3$ МПа, которому соответствует температура насыщения $133,5$ °С, при этом предельная концентрация борной кислоты составляет ~ 400 г/кг H_2O . В расчете учитывалось поступление раствора борной кислоты из гидроёмкостей с концентрацией ~ 16 г/кг H_2O и подача конденсата из трех работающих парогенераторов.

Выполненный оценочный расчет показал, что не исключена вероятность превышения предельной концентрации борной кислоты при длительном аварийном процессе АЭС с ВВЭР (после 24 часа аварии), что, в свою очередь, может послужить причиной ухудшения теплоотвода при аварийном процессе. Капельный унос борной кислоты из активной зоны существенно влияет на время начала кристаллизации H_3BO_3 . Доказательством этому служат полученные при расчете значения максимальной концентрации борной кислоты, зависящие от величины влажности пара. Тем не менее, необходимо принять во внимание консервативность данной расчетной оценки, обусловленной отсутствием экспериментальных данных по процессам выноса борной кислоты из активной зоны.

1. Морозов А.В., Ремизов О.В. Экспериментальное обоснование проектных функций дополнительной системы пассивного залива активной зоны реактора ВВЭР // Теплоэнергетика. 2012. №5. с. 22 – 27.
2. А. А. Немодрук, З.К. Каралова Аналитическая химия бора // М.: Наука, 1964.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №16-19-10649).

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ДЕСОРБЦИЮ КАПЛИ

Морозов В.С., Мисюра С.Я.

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

E-mail: misura@itp.nsc.ru,

Процесс испарения капель однокомпонентных жидкостей на горизонтальной поверхности нагрева исследовался в работах [1-4]. Десорбция и абсорбция водно-солевых растворов LiBr и CaCl₂ широко используется в десорберах и абсорберах абсорбционных тепловых машин. Один из методов увеличения эффективности теплового насоса есть увеличение перегрева раствора, что позволяет увеличить скорость десорбции и коэффициент теплоотдачи. В отличие от испарения однокомпонентных жидкостей, процесс десорбции раствора зависит не только от температуры жидкости и давления пара, но и от концентрации смеси. Для моделирования десорбции важно использовать как уравнение энергии, так и уравнение диффузии. При этом на процесс абсорбции сильно влияет неизотермичность, неучёт которой приводит к двукратному завышению расчёта по сравнению с экспериментальными данными [5]. Для корректного определения плотности массового потока при абсорбции важно учитывать как тепловой поток абсорбции (нагрев жидкости в результате абсорбции), так и поток Стефана [5, 6].

Цель настоящей работы – экспериментальное исследование неизотермической десорбции при существенном изменении по времени концентрации соли, высоты капли и равновесного парциального давления пара на межфазной поверхности, моделирование десорбции с учётом ключевых факторов.

Эксперименты проведены на горизонтальной поверхности нагреваемого металлического цилиндра в атмосфере воздуха при его параметрах: давление 1 атм., влажность 40 %, температура 23 °С. Скорость испарения и концентрация определялись с помощью гравиметрического метода. Равновесное парциальное давление пара определялось по равновесной кривой и по экспериментальным данным температуры свободной поверхности капли и концентрации соли. Температура стенки под каплей определялась термопарами, расположенными вблизи поверхности стенки. Температура свободной поверхности капли определялась тепловизором. Методика и особенности измерений тепловизором представлены в работах [1,7]. Температура стенки цилиндра поддерживалась постоянной в автоматическом режиме и равнялась 80 °С.

С ростом времени десорбции концентрация соли повышалась с 11 % до 65 %, при этом равновесное парциальное давление пара уменьшалось более чем в 10 раз. В существующих моделях расчёта (для упрощения моделирования) при абсорбции коэффициент диффузии для жидкости и теплота абсорбции обычно принимаются постоянными. Кроме того, уравнение диффузии решается при постоянном давлении пара, что существенно упрощает определение плотности потока массы. В настоящей работе моделирование проводится с учётом раздельного влияния ключевых факторов: диффузии в растворе, неизотермичности,

потока Стефана. На Рис. 1 приведены экспериментальные данные и результаты моделирования плотности потока массы.

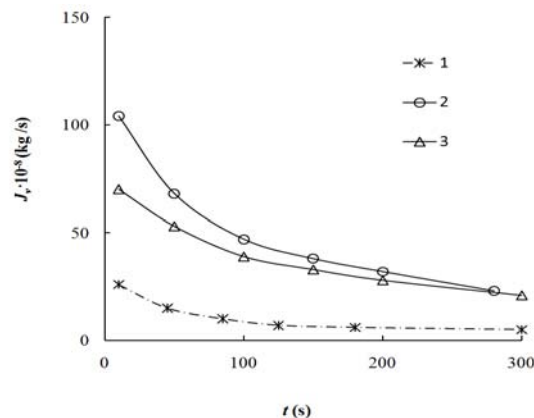


Рис. 1. Плотность массового потока (LiBr - C₀ = 11 %; T_w = 80 °С, V₀ = 300 μl); 1 - моделирование без перемещения межфазной поверхности (V = 0); 2 - моделирование с учётом V; 3 - экспериментальные данные

Как видно из рисунка, неучёт потока Стефана приводит к занижению скорости десорбции более, чем в два раза. Отклонение моделирования от эксперимента на малых временах связано с начальным прогревом капли от температуры окружающей среды до температуры стенки. С ростом времени плотность потока массы существенно уменьшается, так как раствор приближается к равновесию и движущая сила десорбции (разность концентрации соли раствора и равновесной концентрацией) уменьшается.

1. Misyura S.Y. Droplets boiling crisis of ethanol water solution on duralumin substrate with SiO₂ nanoparticles coating. *Experimental Thermal and Fluid Science* 75 (2016) 43-53.
2. Misyura S.Y., Contact angle and droplet evaporation on the smooth and structured wall surface in a wide range of droplet diameters, *Applied Thermal Engineering* 113 (2017) 472-480.
3. Kuznetsov G.V., Feoktistov D.V., Orlova E.G. Evaporation of liquid droplets from a surface of anodized aluminum, *Thermophysics and Aeromechanics* 23 (2016) 17-22.
4. Pavlenko A.N., Tairov E.A., Zhukov V.E., Levin A.A., Moiseev M.I. Dynamics of transient processes at liquid boiling-up in the conditions of free convection and forced flow in a channel under nonstationary heat release, *Journal of Engineering Thermophysics* 23 (3) (2014) 173-193.
5. V.E. Nakoryakov, N.I. Grigorjeva, Nonisothermal absorption in thermotransformers: Novosibirsk, Nauka, 2010.
6. S.H. Chiang, H.L. Toor, Gas absorption accompanied by a large heat effect and volume change of the liquid phase, *A.I.Ch.E. Journal* 10 (3) (1964) 398-402.
7. Elistratov S.L., Slesareva E.Yu. Thermographic study of gas flows, *EPJ Web of Conferences* 2015. Vol. 82, Article number 01060. P. 1-4. DOI: 10.1051/epjconf/20158201060.

Работа поддержана РФФ (грант № 15-19-10025).

Хасанов М.К.¹, Мусакаев Н.Г.²¹ Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета, Стерлитамак² Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, ТюменьE-mail: musakaev@ikz.ru

На сегодняшний момент одним из явлений, напрямую влияющих на климатические условия нашей планеты, считается парниковый эффект. Активное участие в этом процессе принимают так называемые парниковые газы. По степени влияния и воздействия на тепловой баланс Земли одним из основных принято считать углекислый газ. По мнению ряда исследователей стратегия борьбы с усилением парникового эффекта должна заключаться в принятии комплекса мер, среди которых можно выделить снижение концентрации диоксида углерода за счет регулярного удаления CO_2 из атмосферы. Выделенный при этом углекислый газ предлагается размещать в пористые коллекторы, в частности, в истощенные месторождения углеводородного сырья [1, 2]. При достаточно длительном хранении диоксида углерода в виде флюида существует опасность эмиссии газа в атмосферу. В этой связи в ряде работ изучается потенциальная возможность подземного захоронения CO_2 в твердой газогидратной форме [2-4]. Основным аргументом в пользу захоронения диоксида углерода в газогидратном состоянии является способность гидратов связывать значительное количество газа в малом объеме и при относительно небольшом давлении [5, 6].

В настоящей работе на основе уравнений механики многофазных сред построена математическая модель образования гидрата углекислого газа в пористом коллекторе, изначально насыщенном метаном и водой, при инъекции жидкого диоксида углерода с учетом его кипения. При моделировании для описания процессов тепломассопереноса, возникающих нагнетании CO_2 в пласт, приняты следующие допущения. Процесс является однотемпературным, т.е. температуры пористой среды и насыщающего вещества совпадают. Гидрат диоксида углерода есть двухкомпонентная система с известной массовой концентрацией. Скелет пористой среды и газовый гидрат несжимаемы, пористость постоянна, метан является калорически совершенным газом, а жидкая двуокись углерода упругой жидкостью.

Принято, что при инъекции жидкого диоксида углерода в пласт формируются три характерные области. В первой (ближней) области поры насыщены жидким диоксидом углерода и гидратом CO_2 , во второй (промежуточной) зоне присутствуют углекислый газ и гидрат CO_2 , а в третьей (дальней) области поры насыщены метаном и водой. Соответственно существуют две подвижные межфазные поверхности: между первой и второй областями, на которой происходит кипение диоксида углерода, а также между второй и третьей областями, где образуется гидрат CO_2 из углекислого газа и воды.

Система основных уравнений, описывающая процессы фильтрации и теплопереноса в пласте, включает в себя уравнения сохранения масс и энергии, закон Дарси и уравнения состояния для газа и жидкости. На межфазных границах, которые разделяют области и где терпят скачки насыщенности фаз, а также потоки массы и тепла, записываются соотношения, следующие из условий баланса массы и тепла. Кроме того, используются условия непрерывности давления и температуры на этих границах, а также условие фазового равновесия на границе кипения диоксида углерода.

Для указанной задачи построены автомодельные решения одномерной задачи, которые описывают распределения основных параметров в пористом коллекторе. На основе анализа полученных решений установлено, что в определенном диапазоне давлений температура на фронте образования гидрата CO_2 повышается выше температуры его диссоциации. Это обусловлено выделением скрытой теплоты гидратообразования и соответствует режиму с протяженной областью формирования гидрата диоксида углерода. Перегрев газового гидрата не реализуется в тех случаях, когда фронт гидратообразования расположен достаточно близко либо к левой холодной границе пласта, либо к фронту кипения, температура которого также является достаточно холодной вследствие поглощения на нем скрытой теплоты кипения жидкой двуокиси углерода.

1. Oldenburg C.M., Pruess R., Benson S.M. Process modeling of CO_2 injection into natural gas reservoirs for carbon sequestration and enhanced gas recovery // *Energy and Fuel*. 2001. V. 15. P. 293–298.
2. Цыпкин Г.Г. Образование гидрата углекислого газа при его инъекции в истощенное месторождение углеводородов // *Известия РАН. Механика жидкости и газа*. 2014. № 6. С. 101–108.
3. Jadhawar P., Mohammadi A., Yang J., Tohidi B. Subsurface carbon dioxide storage through clathrate hydrate formation // *Advances in the Geological Storage of Carbon Dioxide*. Springer. Printed in the Netherlands, 2006. P. 111–126.
4. Дучков А.Д., Соколова Л.С., Аюнов Д.Е., Пермяков М.Е. Оценка возможности захоронения углекислого газа в криолитозоне Западной Сибири // *Криосфера Земли*. 2009. Т. 13, № 4, С. 62–68.
5. Макогон Ю.Ф. Гидраты природных газов. М.: Недра, 1974. 208 с.
6. Shagapov V.Sh., Musakaev N.G., Khasanov M.K. Formation of gas hydrates in a porous medium during an injection of cold gas // *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. 2015. V. 84. P. 1030–1039.

Работа выполнена при финансовом содействии Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ РФ (НШ-6987.2016.1).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ДОЗВУКОВЫХ МИКРОСТРУЙ ВОЗДУХА ИСТЕКАЮЩИХ В ЗАТОПЛЕННОЕ ПРОСТРАНСТВО

Мухин К.А.^{1,2}, Анискин В.М.²

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

² Институт теоретической и прикладной механики,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

Целью экспериментального исследования является получение экспериментальных данных о структуре и характеристиках плоских дозвуковых микроструй и сравнение полученных параметров с известными данными для макроструй.

В экспериментах исследовались микроструи, истекающие из плоского сопла высотой 83,3 мкм. Максимальная скорость газа на срезе сопла составляла от 6 до 31 м/с. Максимальное число Рейнольдса, достигнутое в экспериментах, определялось максимальным расходом расходомера и составляло 154. Дозвуковая струя истекала в атмосферу, боковые стенки у струи отсутствовали.

Зависимость скорости микроструй вдоль осевой линии показана на рис. 1,а. Здесь U_c – скорость газа вдоль осевой линии струи, U_{c0} – максимальная скорость газа на срезе сопла. Там же приведены экспериментальные данные для турбулентных макроструй [1-7] при различных числах Рейнольдса.

На рис. 1,б приведены распределения уровня турбулентности вдоль осевой линии микроструй и макроструй. Видно, что уровень турбулентности макроструй на срезе сопла значительно превышает уровень турбулентности микроструй, он резко растет и на 10-20 калибрах достигает максимального значения. Для микроструй уровень турбулентности вначале практически нулевой. Однако затем с увеличением расстояния от сопла уровень турбулентности возрастает, что связано с турбулизацией течения.

В работе определены темпы падения скорости дозвуковых микроструй и выполнено сравнение с турбулентными макроструями. Также были измерены поперечные и трансверсальные скорости в микроструях и определен характер расширения ламинарных микроструй, который оказался существенно ниже, чем турбулентных макроструй.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РНФ 17-19-01157.

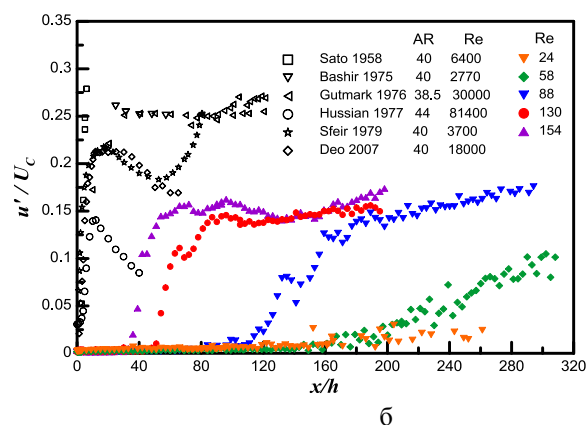
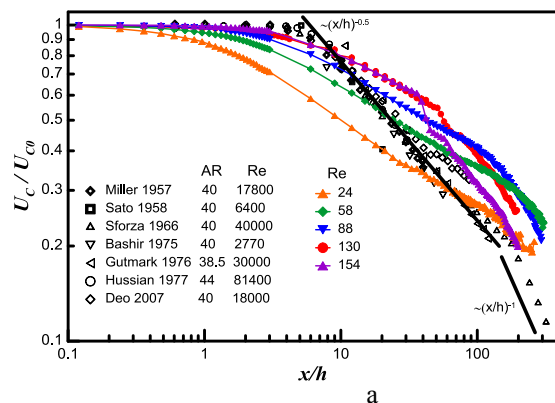


Рис. 1. Распределение скорости (а) и уровня турбулентности (б) вдоль осевой линии струй.

Список литературы:

1. Miller, D. R. and Comings, E. W. Static pressure distribution in a free turbulent jet // J. Fluid Mech. 1957. 3. P. 1–16.
2. Sato, H. The stability and transition of a two-dimensional jet // J. Fluid Mech. 1960. 7. P. 53–80.
3. Sforza, P. M., Steiger, M. H. and Trentacoste, N. Studies on three-dimensional viscous jet // AIAA J. 1966. 4(5). P. 800–806.
4. Bashir J., Uberoi M. S. Experiments on turbulent structure and heat transfer in a two-dimensional jet // Physics of Fluids. 1975. 18(4). P. 405–410.
5. Gutmark, E., Wygnanski, I. The planar turbulent jet // J. Fluid Mech. 1976. 73(3). P. 465–495.
6. Hussain, A. K. M. F., Clark, A. R. Upstream influence on the near field of a planar turbulent jet // Phys. Fluids. 1977. 20(9). P. 1416–1426.
7. Deo R. C., Nathan G. J., Mi J. Comparison of turbulent jets issuing from rectangular nozzles with and without sidewalls // Experimental Thermal and Fluid Science. 2007. 32. P. 596–606.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКОВ ПО СЕЧЕНИЮ ДИСТИЛЛЯЦИОННОЙ КОЛОННЫ В ПРОЦЕССЕ РАЗДЕЛЕНИЯ СМЕСИ ЖИДКОСТЕЙ ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКОМ ИЗМЕНЕНИИ КОНФИГУРАЦИИ ТОЧЕК ОРОШЕНИЯ СТРУКТУРИРОВАННОЙ НАСАДКИ**Павленко А.Н., Жуков В.Е., Печеркин Н.И., Назаров А.Д., Li X., Sui H.**

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

E-mail: zhukov@itp.nsc.ru

Ухудшение эффективности разделения в крупномасштабных массообменных аппаратах химической технологии, как правило, имеет гидродинамическую природу [1], т.е. является следствием неравномерностей распределения потоков жидкости и пара по сечению аппарата. Неравномерность распределения потоков по высоте колонны может возникать также в процессе разделения смеси, когда плотность пара в верхней части колонны становится существенно выше, чем в нижней [2]. Возвратные течения пара наряду с продольным перемешиванием [3] также являются причиной ухудшения эффективности разделения.

Одним из методов устранения поперечной неравномерности движения потоков является создание организованной и управляемой структуры потоков. Применение современных структурированных насадок позволяет существенно более равномерно распределить пленку жидкости по поверхности насадки [4]. Организация пульсирующей подачи жидкости [5] позволяет создать такое распределение фаз в насадочной колонне, при котором высота единицы переноса в жидкой фазе становится существенно меньше, чем в стационарных условиях. В наших экспериментах была реализована идея динамического воздействия на крупномасштабные стационарные структуры в сечении колонны со стороны распределителя жидкости с целью их разрушения.

Эксперименты проводились на крупномасштабном исследовательском стенде, описание которого приведено в работе [2]. В дистилляционной колонне диаметром 0.9 м была установлена структурированная насадка Mellapak 350Y. Опыты проводились на структурированной насадке высотой 2.1 и 4 м. В качестве рабочей смеси использовалась смесь хладонов R-114 и R-21. Для орошения насадки использовался специально разработанный авторами распределитель жидкости. В распределителе установлено 126 электромагнитных клапанов, перекрывающих отверстия диаметром 5 мм. Каждый клапан управлялся от ПК по любому заранее определенному алгоритму. Реакцию колонны на воздействие со стороны распределителя жидкости наблюдали в режиме реального времени по показаниям трех групп термометров. В бинарной смеси имеется однозначная связь между концентрацией и температурой при постоянном давлении. Термометры были установлены в нижнем (два слоя от низа насадки), среднем и верхнем (два слоя от верха насадки) сечениях насадки. Выводимая на монитор информация позволяла оценить как структуру крупномасштабной неравномерности температуры и состава смеси, так и величину этой неравномерности.

Одним из вариантов динамического воздействия на стационарные структуры является попеременное

орошение двух половин сечения насадки, конфигурация *НС (Half_Column)*. В течение периода времени t_1 открыты отверстия в одной половине распределителя, отверстия во второй половине распределителя остаются закрытыми. Затем происходит переключение клапанов и смена орошаемой и неорошаемой зон сечения на период времени t_2 . После этого цикл периодически повторяется. Основной массив данных для конфигурации *НС* получен при равных значениях времен t_1 и t_2 в диапазоне от 5 до 160 с.

Орошение половины сечения колонны является существенно неравномерным, при этом в случае стационарного режима эффективность разделения смеси намного ниже, чем при равномерном орошении насадки. В случае периодического орошения диаметрально расположенных областей сечения насадки с периодом, соизмеримым со временем пребывания жидкости в насадке, наблюдается тенденция к формированию новой крупномасштабной структуры распределения температуры в различных сечениях колонны. Поскольку каждое переключение является причиной формирования крупномасштабной неравномерности с диаметрально противоположным расположением, то при периодах переключения, соизмеримых с собственными временами формирования крупномасштабной неравномерности, наблюдается пульсирующее изменение степени неравномерности распределения. Данному режиму динамического орошения насадки соответствует более эффективное разделение смеси. Существенно неравномерное периодическое орошение насадки способно увеличить эффективность разделения колонны в пределах 20% при значениях периода переключения, соизмеримых с собственными временами формирования крупномасштабной неравномерности распределения параметров потоков.

1. Розен А.М., Костанян А.Е. К вопросу о масштабном переходе в химической технологии // *ТОХТ*. 2002. Т. 36, № 4. С. 339-346.
2. Pavlenko A.N., Zhukov V.E., Pecherkin N.I. et al. Investigation of flow parameters and efficiency of mixture separation on a structured packing // *AIChE J.* 2014. V. 60, Is. 2. P. 690-705.
3. Лаптева Е.А., Лаптев А.Г. Прикладные аспекты явлений переноса в аппаратах химической технологии и теплоэнергетики. Казань: Печать-Сервис XXI век, 2015. 236 с.
4. Pavlenko A.N., Zeng J., Pecherkin N.I., Zhukov V.E., Volodin O.A. Separation efficiency and pressure drop of SiC ceramic and Mellapak structured packings // *Journal of Engineering Thermophysics*. 2016. V. 25, No. 1, P. 1-14.
5. Мемедяев З.Н., Кулов Н.Н., Москалик В.М. Гидродинамика и массообмен в орошаемой насадке при пульсирующей подаче жидкости // *ТОХТ*. 1994. Т. 28, № 5. С. 483-489.

Исследование выполнено в ИТ СО РАН за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-49-00010)

КАПИЛЛЯРНЫЙ ГИСТЕРЕЗИС ОГРАНИЧЕННОГО ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ЖИДКОСТИ

Наумов И.В.¹, Шарифуллин Б.Р.¹, Штерн В.Н.²

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

² Shtern Research and Consulting, Houston, USA

E-mail: naumov@itp.nsc.ru

Широкое развитие вихревых биореакторов обуславливает практический интерес в исследовании топологии двухкомпонентной жидкости [1]. Кроме этого вихревое течение двухкомпонентной жидкости имеет и большой фундаментальный интерес из-за ряда интригующих особенностей: многочисленные топологические метаморфозы, обилие ячеек и тонких слоев циркуляции [2-3], интенсифицирующих или замедляющих массоперенос. Преимущество исследования этих явлений в замкнутом цилиндрическом контейнере состоит в хорошо определенных граничных условиях и легко изменяемых контрольных параметрах, что позволяет проводить детальные сравнения результатов экспериментального и численного моделирования. В данной конфигурации вихревое движение жидкости определяется числом Рейнольдса:

$$Re = \frac{\omega R^2}{\nu} \quad (1)$$

где ω – угловая скорость вращения диска, R – радиус диска, ν – кинематическая вязкость жидкости, соприкасаемой с вращающимся диском (рис. 1).

В работе [4] визуально исследована структура течения силиконового масла и воды. С усилением вращения, характеризуемым числом Рейнольдса, граница раздела деформировалась, принимая формы, названные авторами "горб", "пик", "гора Фудзи" и "колокол". Аналогичные результаты были получены в работе [5], где было обнаружено возникновение контрциркуляции в верхней жидкости. При этом, гистерезис в закрученном потоке двухкомпонентной жидкости остался неизученным.

В нашей работе проведено исследование топологии течения, возникновение зон рециркуляции и гистерезиса, связанного с капиллярным взаимодействием границы раздела (подсолнечное масло-вода) с вращающейся крышкой и неподвижными боковыми стенками в вертикальном герметичном цилиндрическом контейнере. Разница в плотностях между жидкостями обеспечивает устойчивую границу раздела. Использовался цилиндрический контейнер с радиусом 45 мм и высотой 90 мм, заполненный водой и подсолнечным маслом. Вихревое движение генерировалось вращающимся диском, установленным на высоте h (рис. 1.).

Гистерезис у верхнего вращающегося диска наблюдался при объемной доле воды 60-95%. По мере того как число Рейнольдса увеличивается, граница раздела деформируется, поднимаясь вверх вблизи оси и опускаясь вниз на периферии. Граница раздела касается крышки при $Re = Re_1$. Дальнейшее увеличение Re происходит до нестационарного режима, при котором граница раздела не разрушается. При уменьшении Re , граница раздела отделяется от крышки при $Re = Re_2 < Re_1$.

Гистерезис у боковых стенок фиксировался по той же схеме, но при объемной доле воды 10-20%.

Выявлены закономерности формирования ячейистой структуры ограниченного вихревого течения двухкомпонентной жидкости. Подтверждено численное предсказание наличия тонкого слоя циркуляции воды, примыкающего к границе раздела. Получено, что ширина петли гистерезиса у верхнего диска увеличивается при уменьшении объемной доли масла, а у боковых стенок увеличивается при уменьшении объемной доли воды.

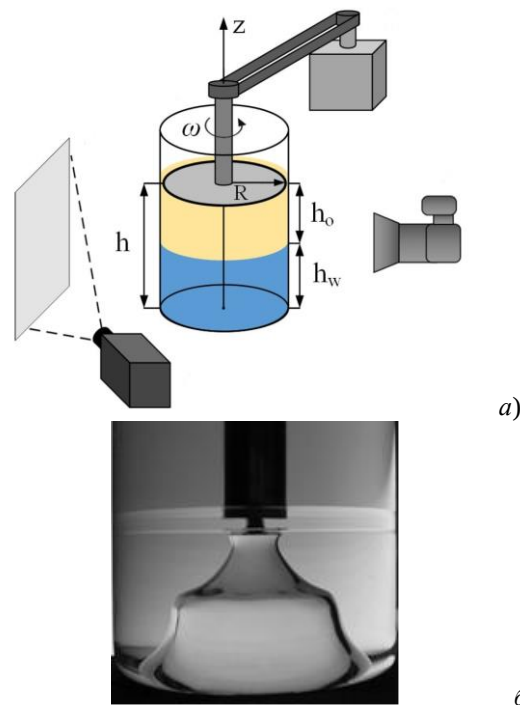


Рис. 1. Цилиндрический контейнер, заполненный двухкомпонентной жидкостью. а – схема эксперимента (h – общая высота системы, h_o – высота слоя масла, h_w – высота слоя воды); б – фото границы раздела

Список литературы

1. Balci A., Brons M., Herrada M.A., Shtern V.N. Vortex breakdown in a truncated conical bioreactor // Fluid Dyn. Res. 2015. V.47, P. 065503.
2. Herrada M.A., Shtern V.N. Patterns of a creeping water-spout flow // J. Fluid Mech. 2014. V. 744, P.65-88.
3. Carrion L., Herrada M.A., Shtern V.N. Topology and stability of a water-soybean-oil swirling flow // Phys. Rev. Fluids 2017. V.2, P. 024702.
4. Fujimoto S., Takeda Ya. Topology changes of the interface between two immiscible liquid layers by a rotating lid // Phys. Rev. E. 2009. V.80, P.015304(R).
5. Tsai J.C., Tao C.Y., Sun Y.C., Lai C.Y., Huang K.H., Juan W.T. and Huang J.R. Vortex-induced morphology on a two-fluid interface and the transitions // Phys. Rev. E. 2015. V.92, P.031002(R).

Работа поддержана РФФ (грант № 14-29-00093).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ИМПАКТНОЙ СТРУЕ С ШЕВРОНАМИ

Небучинов А.С.

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

E-mail: nebuchinov.alexander@gmail.com

Импактные течения являются одной из наиболее часто встречающихся форм организации эффективного тепломассообмена. Причина этого – с одной стороны, в простоте технической реализации, а с другой – в чрезвычайно высокой интенсивности процессов переноса. Современные энергетические технологии требуют отвода большого количества теплоты от рабочих теплообменных поверхностей. Возможности классических способов интенсификации теплообмена к настоящему времени практически исчерпаны.

Известно, что эффективность теплообмена импактной струи может быть увеличена за счет применения различных методов управления спектральным составом и/или масштабом турбулентности, а также процессами крупно- и мелкомасштабного переноса. В основе одного из таких методов лежит изменение формы выходной кромки сопла путем создания регулярных неоднородностей, таких как шевроны.

Шевроны меняют структуру течения, в частности распределения турбулентных характеристик, сразу за выходом из сопла. Известно, что шевронная струя быстрее расширяется вниз по потоку и имеет более изрезанную структуру по сравнению с классической осесимметричной струей. Это приводит к интенсификации турбулентного перемешивания и уменьшению длины начального участка шевронной струи [1]. Вместе с тем, сопла с шевронами широко используются в качестве эффективного средства подавления акустического шума [2]. Но гидродинамическая структура и теплообмен в таких течениях изучены в существенно меньшей степени по сравнению с акустическими свойствами. В ряде работ было показано, что шевроны позволяют повысить (до 25%) коэффициенты тепломассообмена [3] и сделать их распределение вдоль поверхности более равномерным по сравнению со случаем стандартной (круглой) струи.

С использованием бесконтактных панорамных оптических методов измерения было выполнено комплексное экспериментальное исследование структуры течения и теплообмена в затопленной импактной струе с четырьмя шевронами. Исследования проводились при числах Рейнольдса 6 000. Расстояние между импактной поверхностью и срезом сопла H/D составляло 1, 3 и 6 калибров.

На рис. 1 - а представлен пример распределения мгновенной температуры на нагреваемой поверхности при одном из режимов натекания струи при $Re = 6000$, количество шевронов - 4. $h/D=3$. Можно видеть, что в шевронной струе распределение температуры имеет радиально-неоднородный вид, напоминающий 4-хконечную звезду, повторяющей

форму сопла с шевронами. Далее, усреднив температуру по нагревателю, были рассчитаны радиальные распределения среднего числа Нуссельта (Nu). На рис. 1 - б, в качестве примера, представлено распределение среднего числа Нуссельта вдоль поверхности нагревателя шевронной струи при $Re=6000$, $h/D=3$, в сравнении с круглой. Для струи с шевронами на центральной оси находится максимум Nu , что говорит о наиболее интенсивном теплообмене в этой области. Далее значения интенсивности теплообмена плавно снижаются по мере удаления от оси потока в отличие от круглой струи, которая имеет характерный вид с двумя локальными максимумами Nu примерно на расстояниях порядка $r/D = 0,7$ и $r/D = 2,8$. В области $r/D = 0 - 3$, в случае струи с шевронами, средняя интенсивность теплообмена на 17% выше, по сравнению с круглой. Подобная тенденция сохраняется при всех расстояниях между соплом и импактной поверхностью (h/D). Таким образом, шевроны выступают, в качестве пассивных интенсификаторов теплообмена в импактных струях. Такие подходы могут быть использованы в развитии технологий энергоэффективного производства.

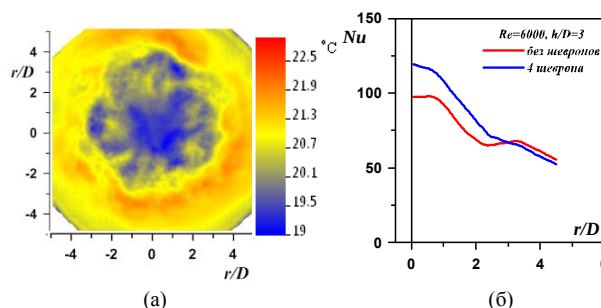


Рис. 1 (а) Распределения мгновенной температуры на нагреваемой поверхности при $Re = 6000$, $h/D = 3$; (б) радиальное распределение среднего числа Нуссельта вдоль поверхности нагревателя.

Список литературы

1. Schram C. Aeroacoustics of subsonic jets: prediction of the sound produced by vortex pairing based on particle image velocimetry // Ph.D. Thesis, Technische Universiteit Eindhoven, 2004.
2. Bridges J., Brown C.A. Parametric testing of chevrons on single flow hot jets // Proc. 10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. Manchester. GB, 2004. Paper AIAA 2004-2824.
3. Gao N., Sun H., Ewing D. Heat transfer to impinging round jets with triangular tabs // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2003. V. 46. P. 2557–2569.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты №№ 16-38-00854-мол_а) и гранта Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ НШ-10179.2016.8.

КРИТЕРИЙ ВЛИЯНИЯ ВЫТАЛКИВАЮЩЕЙ СИЛЫ НА ДВИЖЕНИЕ ПЛАВУЧЕГО ВИХРЕВОГО КОЛЬЦА

Никулин В.В.

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

E-mail: nikulin@hydro.nsc.ru

Исследованиям движений однородных вихревых колец, а также всплывающих в поле тяжести неоднородных посвящено значительное количество работ. В то же время движение плавучих вихревых колец, имеющих начальную скорость, оказалось практически не изученным. В частности неизвестно, как изменяется влияние выталкивающей силы на движение вихря в зависимости от начальной скорости или соответствующего числа Рейнольдса.

Одним из ярких свойств вихревых колец является линейность увеличения их размеров в зависимости от пройденного расстояния, по крайней мере, на начальном этапе движения. Данный эффект характеризуется углом расширения кольца α , который равен dR/dz , R – радиус кольца, z – координата, вдоль которой происходит движение. К настоящему времени установлено, что угол расширения всплывающих вихрей на порядок величины больше, чем у вихрей в однородной жидкости. Таким образом, выталкивающая сила оказывает существенное влияние на динамику вихревых колец. В связи с этим полезно вырабатывать критерий, характеризующий влияние выталкивающей силы на их движение.

В работе [1] представлена аналитическая модель, описывающая движение однородных и плавучих неоднородных вихревых колец. В ней в частности получена формула для вычисления начального угла расширения α_1 , которую можно записать в следующем виде:

$$\alpha_1 = \alpha_* + \beta F / (2\pi \rho_0 v^2 Re_1^2) \quad (1)$$

$\beta = const \approx 0,3$, F – интегральная сила плавучести, v и ρ_0 – кинематическая вязкость и плотность жидкости, $Re_1 = u_1 R_1 / \nu$, R_1 и u_1 – начальные радиус и скорость вихря. Параметр α_* можно рассматривать как угол расширения кольца в однородной жидкости, поскольку случай $F = 0$ соответствует движению в однородной жидкости. Если движение происходит по направлению действия выталкивающей силы, то $F > 0$, если против, то $F < 0$. Отметим, что тогда из (1) следует, что угол расширения плавучих вихрей движущихся по направлению действия выталкивающей силы должен быть больше, чем у вихрей в однородной жидкости.

Обозначим второе слагаемое в правой части (1) через K . В качестве меры влияния выталкивающей силы примем отношение $\kappa = K/\alpha_*$. Тогда (1) можно записать в виде: $\alpha_1 = \alpha_*(1+\kappa)$. Отсюда, если $\kappa \ll 1$, то влияние выталкивающей силы не существенно, если $\kappa > 1$, то велико. Для вычисления α_* примем эмпирическую формулу, полученную в [2] на основе экспериментов, выполненных при числах $Re_1 > 4000$: $\alpha_* = 3 \cdot 10^{-3} + 50/(Re_1 - 10^3)$. Отсюда и из (1) можно установить, что κ , а, следовательно, влияние выталкивающей силы монотонно убывает с ростом Re_1 .

Для проверки выводов теоретической модели [1] и следующего из нее критерия плавучести были выполнены эксперименты с плавучими вихрями, движущимися в воде по направлению действия выталкивающей силы. В экспериментах выталкивающая сила создавалась путем захвата вихрем воздуха внутрь ядра. В этом случае $F = \rho_0 g V$, g – ускорение свободного падения, V – объем воздуха. Используя выражения для K и α_* , приравнявая κ к 1, можно определить объем воздуха V_m такой, чтобы при $Re_1 > 4000$ и $V < V_m$ влияние плавучести было незначительным. Полагая $\kappa = 1$, $Re_1 = 4000$, получим: $V_m \approx 0,7 \text{ см}^3$. В экспериментах исследовались вихри с малой плавучестью, $V = 0,3 \text{ см}^3$ и большой – $V = 7,5 \text{ см}^3$; числа Re_1 изменялись от 4200 до 28500, при этом для первых вихрей параметр κ изменялся от 0,4 до 0,04, для вторых от 140 до 70. На рисунке точки – экспериментальные значения углов расширения при разных V и числах Re_1 ; сплошная кривая – эмпирическая зависимость $\alpha_*(Re_1)$ из работы [2].

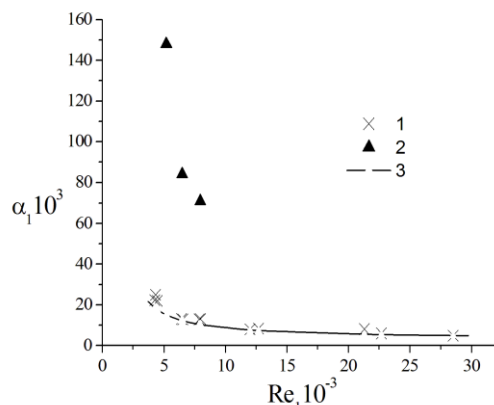


Рис. Углы расширения плавучего вихревого кольца, движущегося вертикально вверх, содержащего в своем ядре воздух объемом $0,3 \text{ см}^3$ (1), объемом $7,5 \text{ см}^3$ (2), эмпирическая зависимость $\alpha_*(Re_1)$ из работы [2] (3).

Из рисунка следует, что для плавучих вихрей, у которых параметр $\kappa \gg 1$, также и $\alpha_1 \gg \alpha_*$. У вихрей, для которых κ меньше 1, угол расширения незначительно превышает α_* . Таким образом, движение первых отличается сильно, а вторых незначительно от движения вихревых колец в однородной жидкости, а величина параметра κ является характеристикой влияния выталкивающей силы на движение вихревых колец.

1. Никулин В.В. Аналитическая модель движения турбулентных вихревых колец в несжимаемой жидкости // ПМТФ. 2014. №4. С. 11-18.
2. Тарасов В.Ф. Оценка некоторых параметров вихревого кольца // Динамика сплошной среды / АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т гидродинамики. 1973. Вып. 14. С. 120-127.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РЭЛЕЯ-ТЕЙЛОРА И РИХТМАЙЕРА-МЕШКОВА

Фортова С.В.¹, Шепелев В.В.¹, Трошкин О.В.¹, Опарин Е.И.¹, Козлов С.А.¹

¹ Институт автоматизации проектирования РАН, Москва

E-mail: sfortova@mail.ru

Важным разделом вычислительной гидродинамики является численное моделирование роста и развития гидродинамических неустойчивостей. Сложность и специфика задач, а также возможность сравнения с экспериментальными данными позволяет не только всесторонне исследовать явление, но и использовать такие задачи для исследования разностных методов и верифицирования гидродинамических кодов.

В работе представлены результаты численного моделирования развития гидродинамических неустойчивостей Рихтмайера-Мешкова и Рэля-Тейлора на примере известных экспериментальных постановок [1], [2]. Для моделирования использован программный пакет TPS (Turbulence Problem Solver), позволяющий универсальным образом решать широкий спектр задач гидродинамики, описываемых гиперболическими уравнениями. Моделирование производилось с помощью метода крупных частиц и ENO-схемы второго порядка с солвером Роу для приближенного решения задачи Римана.

Неустойчивость Рэля-Тейлора

Рассматривается один из известных экспериментов Рида [1] по исследованию роста и развития неустойчивости Рэля-Тейлора. Экспериментальная область представляет собой кювету, толщина которой существенно меньше ширины и высоты. Кювета разделена тонкой перегородкой на две части – в верхней находится спирт, а в нижней воздух. Кювета разгоняется специальными двигателями до значительных ускорений в 50-70g. Процесс фиксируется на фото пленке. На Рис. 1 показаны фотографии положения границы между воздухом и спиртом в моменты времени 0 мс, 21.5 мс, 32.5 мс. Результаты численного моделирования, представленные на Рис.2, хорошо согласуются с натурным экспериментом.

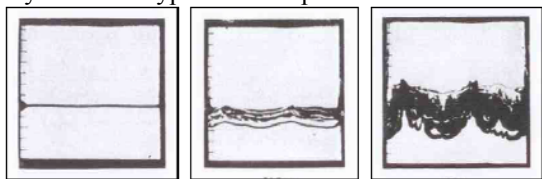


Рис.1. Положение границы «воздух-спирт» в эксперименте в моменты времени 0 мс, 21.5 мс, 32.5 мс.

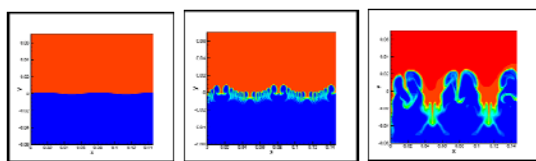


Рис.2. Развитие неустойчивости Рэля-Тейлора, $t = 0$ мс (возмущенная граница), 8 мс, 16 мс.

Неустойчивость Рихтмайера-Мешкова

В работе [2] экспериментально исследуется нелинейная стадия роста НРМ в трубе квадратного сече-

ния. Соседние области, заполненные ксеноном и аргоном, первоначально отделены лавсановой пленкой.

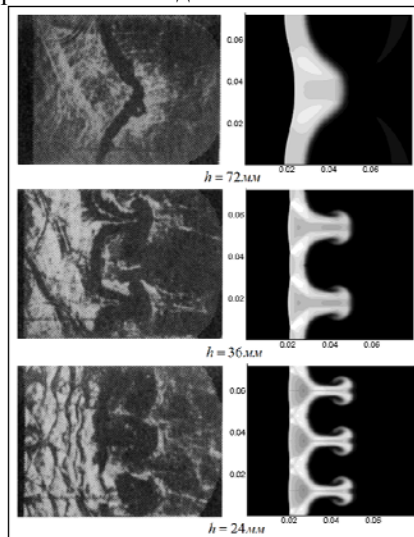


Рис.3. Развитие неустойчивости Рихтмайера-Мешкова: эксперимент [2] слева, моделирование справа. Время 140 мкс.

К границе со скоростью 600 м/с (число Маха 3.5) справа движется фронт ударной волны, содержащей сжатый аргон. На Рис.3 представлены результаты численного моделирования и фотографии результатов натурного эксперимента в момент времени 140 мкс. В случае одномодового возмущения $h = 72$ мм развитие неустойчивости происходило медленнее всего. При моделировании нелинейная стадия развивалась до переходной стадии, с образованием характерных для нее грибовидных структур. Уменьшение длины начального возмущения приводит к сокращению длительности каждой стадии. Поэтому к моменту времени 140 мкс в случае $h = 9$ мм в слое перемешивания наблюдается развитая турбулентность. Рис. 3 демонстрирует хорошее согласование результатов численного и натурного экспериментов.

1. Read K. I., Experimental investigation of turbulent mixing by Rayleigh-Taylor instability, *Physica D* 12, 45-58 (1984).
2. Алешин, А. Н., Гамалий, Е.Г., Зайцев, С. Г., Лазарева, Е. В., Лебо, И.Г., Розанов, В. Б.. Исследование нелинейной и переходной стадии развития неустойчивости Рихтмайера-Мешкова. Письма в ЖТФ 10 (1988).
3. С. В. Фортова, Л. М. Крагинский, А. В. Чикиткин, Е. И. Опарина, Программный пакет для решения гиперболических систем уравнений, *Мат. моделирование*, т. 25, № 5, стр. 123-135 (2013).

Работа поддержана Российским Научным Фондом (Соглашение №17-11-01293) и Российским Фондом Фундаментальных Исследований (проект № 17-01-00812).

ИССЛЕДОВАНИЕ СНИЖЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ УДАРНЫХ ВОЛН В «ПСЕВДОКИПЯЩЕМ» СЛОЕ

Павлов Г.И., Теляшов Д.А., Кочергин А.В., Накоряков П.В., Суховая Е.А.

Казанский национальный исследовательский технический университет – КАИ им. А.Н. Туполева
(КНИТУ – КАИ)

E-mail: pavlov16@mail.ru

Камеры пульсирующего горения (КПГ) давно используются в теплоэнергетике. Также они находят применение в качестве двигателей на беспилотных летательных аппаратах. Это объясняется простотой конструкции, полнотой сгорания топлива и высоким КПД. По эксплуатационным характеристикам предпочтительнее (КПГ) с аэродинамическим клапаном (АК). Такие камеры дешевле в изготовлении и имеют большой ресурс работы. Однако, широкое их внедрение ограничивается повышенным уровнем шума. Сложность решения проблемы шума КПГ связана с некоторыми особенностями, характерными для камер сгорания - в (КПГ) горение топлива происходит в резонансном пульсационном режиме. Причем, колебательные процессы в (КПГ) – низкочастотные, чем ограничивается принятие того или иного конструкторского решения, направленного на шумоподавление. Снижением шума (КПГ) занимаются многие исследователи. В научно-технической литературе опубликовано много интересных идей и конструктивных схем. Несмотря на это, эффективные шумоглушители для (КПГ) промышленностью не выпускаются.

(КПГ) с аэродинамическим клапаном имеет два источника шума: газовая струя, истекающая из аэродинамического клапана; высокотемпературные продукты сгорания, выбрасываемые из (КПГ) через резонансную трубу. Наиболее проблемным является шум (АК), так как (АК) в один момент времени должен обеспечить надежное запираание полости камеры сгорания, в другой момент времени – обеспечить полноту поступления окислителя воздуха в зону горения. (КПГ) с аэродинамическим клапаном, как устройство, известна давно. Однако работ с детальными исследованиями механизма шумообразования (АК) в открытой печати не имеется. Без ясного представления физической картины, протекающей в аэродинамическом клапане решить задачу шумоподавления не представляется возможным. Опытами установлено, что основным источником шума (АК) являются ударные волны малой интенсивности, которые формируются чередой волн сжатия, зарождаемых при горении углеводородной смеси в КПГ. Форма акустического сигнала, записанного у среза клапана, не синусоидальная, имеет импульсный характер. В то же время, пульсации давления, зарегистрированные непосредственно в камере сгорания изменяются по гармоническому закону. Выявленный факт сужает область дальнейших исследований и позволит идти по правильному направлению.

Авторами работы впервые предложен эффект шумоглушения газовых струй дисперсными частицами, находящимися во взвешенном состоянии. Для проведения детальных исследований данного эффекта разрабатывался испытательный стенд. Стенд позволял моделировать газовую струю, истекающую из (АК) камеры пульсирующего горения.

Объектом исследования являлся шумоглушитель, включающий в себя: вертикально расположенную цилиндрическую камеру, гранулы, входное и выходное устройство. Общий вид рабочего участка приведен на рисунке 2.



Рисунок 1 – Общий вид рабочего участка

Опыты проводились с разными параметрами «псевдооживленного слоя»: тип псевдооживления; высота слоя гранул; диаметр используемых гранул; амплитуда пульсаций давления в газовом потоке; частота пульсаций. Оценка эффективности сглаживания пульсирующего течения газов проводилась путем сопоставления уровня звукового давления, полученного на входе и выходе шумоглушающего устройства. Попытка использования вышеуказанного эффекта для снижения интенсивности ударных волн малой интенсивности, формируемых (АК) камеры пульсирующего горения, являлась основной целью авторов данной работы. По результатам проведенных исследований предложена техническая схема глушителя шума для (АК). В качестве дисперсных частиц использовались керамические гранулы. Рабочим топливом для (КПГ) являлся пропан. В ходе опытов оценивалась эффективность работы глушителя и его влияние на работу КПГ. Опыты показали, что использование псевдооживленного слоя для снижения шума (АК) КПГ является перспективным.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛООТДАЧИ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ТЕМПЕРАТУРЫ СТЕНКИ

Газизов И.М., Давлетшин И.А., Паерелий А.А.

Казанский научный центр РАН, Казань

E-mail: tpaereliy@yandex.ru

Поиск параметров конвективного теплообмена в основном опирается на уравнение теплового баланса обтекаемого тела [1, 2]. Этот метод требует достоверной информации по температурам теплоносителя и стенки. В каналах со сложной конфигурацией и структурой течения [3] измерения температур стенки должны охватывать определенные пространственные и временные интервалы. Соответственно, для получения распределений тепловых потоков требуется значительное количество измерителей. Таким образом, разработка надежного и точного способа измерения распределения коэффициента теплоотдачи является актуальной задачей в области экспериментальных исследований.

Для организации конвективного теплообмена и измерений локальных значений температуры стенки в данной работе предлагается использовать печатную плату из стеклотекстолита толщиной $\delta=1,6$ мм (рис. 1). Малая толщина теплообменной стенки и малая теплопроводность $\lambda=0,3$ Вт/(м·К) ее материала позволяют считать, что тепловые потоки теплопроводностью вдоль стенки много меньше отвода тепла в теплоноситель. Тогда при наличии эффективной теплоизоляции снаружи уравнение теплового баланса элемента стенки будет содержать только одну величину теплового потока – теплоотдачу от стенки к течению рабочей среды. В этих условиях измеряемые величины (температура, тепловой поток) могут считаться локальными, относящимися к данному участку (сечению) канала.

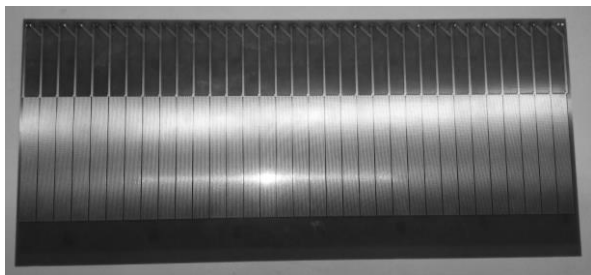


Рис. 1. Измерительная плата (теплообменная стенка).

Медный слой на поверхности платы длиной 450 мм был вытравлен в виде дорожки, участки которой функционально представляли собой 33 термометра сопротивления. Участок, занимаемый каждой дорожкой (термометром), имел длину 13 мм и ширину 100 мм. Соответственно, имелась возможность измерять локальные по длине и средние по сечению канала значения температуры стенки с шагом 13,5 мм.

При малых числах Био ($Bi = \alpha\delta/\lambda \ll 1$) коэффициент теплоотдачи α на стенке площадью F и объемом V определяется по темпу m изменения температуры на регулярном режиме охлаждения (нагрева) [4]:

$$m = \psi \alpha F / (\rho c V),$$

где ρ , c – плотность и теплоемкость материала стенки; коэффициент неравномерности температурного поля стенки $\psi = (B^2 + 1,44B + 1)^{-0,5}$. Здесь модифицированное число Био $B = \alpha FK / (\lambda V)$, в котором K – коэффициент формы тела. Для тонкой пластины:

$$K = (\delta/\pi)^2; \quad B = \alpha\delta/(\lambda \pi^2); \quad m = \psi\alpha/(\rho c\delta).$$

Для исследуемой стенки параметры составили:

– при $\alpha=20$ Вт/(м²·К): $B=0,011$; $Bi=0,1$; $\psi=0,99$;

– при $\alpha=100$ Вт/(м²·К): $B=0,054$; $Bi=0,53$; $\psi=0,96$.

Таким образом, для характерных в газовых потоках величин коэффициента теплоотдачи даже при допущении о равномерности температурного поля по толщине стенки погрешность метода будет находиться в диапазоне от долей процента до нескольких процентов (по отклонению ψ от 1).

Проведены тестовые эксперименты, в которых теплообменная стенка являлась частью стенки плоского канала сечением 115×150 мм² и длиной 1,2 м. Полученные распределения коэффициента теплоотдачи (рис. 2) показали хорошее согласование с классическими представлениями о теплоотдаче на начальном участке канала как по характеру зависимостей, так и по величинам.

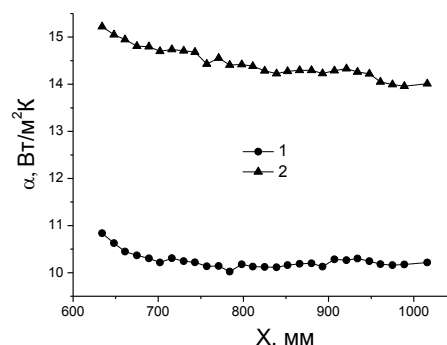


Рис. 2. Коэффициент теплоотдачи при среднерасходной скорости воздуха 1,9 м/с (1) и 3,1 м/с (2).

Результаты работы показывают, что предложенный способ измерения распределения коэффициента теплоотдачи адекватно отражает реальные процессы передачи тепла.

Список литературы:

1. Зверев В.Г., Назаренко В.А., Панько С.В., Теплоухов А.В. Определение параметров конвективного теплообмена по измерениям температуры материала // ТВТ. 2010. Т. 48. № 5. С. 779.
2. Михеев Н.И., Давлетшин И.А. Метод измерения осредненных значений коэффициента теплоотдачи в сложных течениях // Известия РАН. Энергетика. 2005. № 6. с. 16-19.
3. Михеев Н.И., Давлетшин И.А., Молочников В.М. Теплообмен при отрыве пульсирующего потока // Тепловые процессы в технике. 2009. Т. 1. № 8. С. 314.
4. Лыков А.В. Теория теплопроводности // М.: Высшая школа, 1967. 599 с.

ПУЗЫРЬКОВЫЕ СВОБОДНЫЕ И ИМПАКТНЫЕ СТРУИ В УСЛОВИЯХ ПУЛЬСАЦИЙ РАСХОДА: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДАМИ PIV/PFBI/PTV

Ничик М.Ю.², Тимошевский М.В.¹, Первунин К.С.^{1,2}, Маркович Д.М.^{1,2,3}

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

² Новосибирский национальный исследовательский государственный университет (НГУ), Новосибирск

³ Томский политехнический университет (ТПУ), Томск

E-mail: pervunin@itp.nsc.ru

Двухфазные пузырьковые течения представляют большой интерес для исследования вследствие их широкого использования во многих технологических процессах. На практике жидкости зачастую намеренно насыщаются пузырьками газа для интенсификации массопереноса между фазами благодаря большой площади межфазной поверхности (даже при относительно невысоких объемных газосодержаниях) и для увеличения степени перемешивания вследствие генерации вихрей за пузырями. В настоящее время известно, что непрерывная и дисперсная фазы оказывают взаимное влияние друг на друга. В зависимости от размера пузырей и характерных масштабов турбулентности могут наблюдаться различные эффекты. Так, на траектории пузырей влияет анизотропность турбулентных флуктуаций в жидкости (турбулентная дисперсия), а движение как отдельных пузырей, так и их кластеров изменяет распределение и интенсивность турбулентных характеристик в жидкости (модуляция турбулентности).

В работе была изучена гидродинамическая структура пузырьковых турбулентных осесимметричных струй (свободных и импактных), а также исследована эволюция когерентных структур, развивающихся в их слоях смешения как в естественных условиях, так и в условиях наложенных внешних периодических пульсаций расхода. Для визуализации пузырей в экспериментах был использован метод плоскостной флуоресценции (Planar Fluorescence for Bubbles Imaging – PFBI [1, 2]) в комбинации с подходами цифровой трассерной визуализации (Particle Image Velocimetry – PIV) и трекинга частиц (Particle Tracking Velocimetry – PTV) для измерения скорости непрерывной и дисперсной фаз соответственно. В двумерной постановке образы пузырей и трассеров фиксируются одной камерой. Таким образом, удается измерять одновременно параметры дисперсной фазы и турбулентные характеристики непрерывной фазы в одном и том же сечении (рис. 1-а). Для идентификации пузырей на изображениях и определения их положений и размеров, а также последующего расчета локального газосодержания был использован подход, основанный на применении искусственного машинного обучения – сверточных нейронных сетей [3].

Для изучения эволюции когерентных структур и более подробного исследования механизмов взаимодействия фаз измерения были выполнены также с помощью метода условного осреднения. Для этого с помощью электромагнитного вибратора на поток жидкости были наложены гармонические колебания малой амплитуды на частоте наибольшей восприимчивости струй, что позволяет увеличить степень когерентности крупномасштабных вихревых структур (рис. 1-б). Пузырьковые струйные течения исследо-

вались при числе Рейнольдса 12 500 и нескольких объемных газосодержаниях: от 0 до 2,5%. На основе 10 000 измеренных полей мгновенной скорости для обеих фаз и локального газосодержания были рассчитаны средние и турбулентные характеристики течений, включая смешанные одноточечные корреляции до третьего порядка.

Удалось обнаружить, что при наложении внешних пульсаций расхода происходит существенная интенсификация среднего уровня турбулентных флуктуаций скорости непрерывной фазы: в полтора раза для однофазного и в два раза для двухфазного течения. При этом их максимум сдвигается ближе к соплу. Вместе с тем, интенсивность турбулентности заметно возрастает вблизи импактной поверхности, причем с увеличением объемного газосодержания этот эффект усиливается. Вместе с тем, в двухфазном потоке когерентные структуры оказываются более долгоживущими.

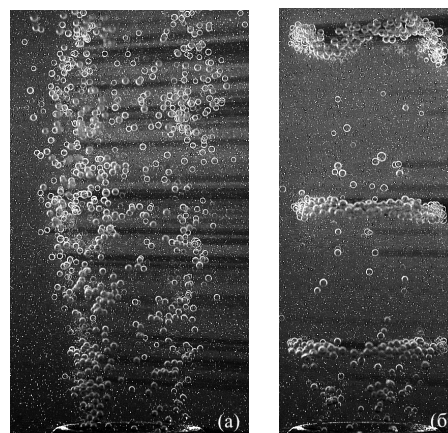


Рис. 1. Фотографии свободной осесимметричной пузырьковой струи методом PFBI в условиях (а) свободного истечения и (б) наложенных пульсаций расхода несущей фазы при $\beta = 1\%$ и $Re = 12500$. На изображении (б) можно идентифицировать когерентные структуры, в центрах которых кластеризуются пузырьки газа, также можно видеть, что самая верхняя структура уже начинает испытывать аксиальную устойчивость и теряет свою тороидальную форму.

Список литературы

1. Akhmetbekov Ye.K., Alekseenko S.V., Dulin V.M., Markovich D.M., Pervunin K.S. Planar fluorescence for round bubble imaging and its application for the study of an axisymmetric two-phase jet // Experiments in Fluids. 2010. V. 48, No. 4. P. 615–629.
2. Dulin V.M., Markovich D.M., Pervunin K.S. The optical principles of PFBI approach // AIP Conference Proceedings. 2012. V. 1428. P. 217–224.
3. Poletaev I.E., Pervunin K.S., Tokarev M.P. Artificial neural network for bubbles pattern recognition on the images // IOP Conference Series. 2016. V. 754. P. (072002)–13.

СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ИЗОБРЕТЕНИЙ В ОБЛАСТИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

Перепечко Л.Н.¹, Шарина И.А.¹

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

E-mail: sharina@itp.nsc.ru

Наиболее эффективным методом решения практических задач в области теплофизики является физическое моделирование систем и процессов с реализацией на компьютере. В алгоритмах программной реализации математических моделей сложных физических процессов часто содержатся новые методы и технические решения, обладающие большой коммерческой ценностью. Такие решения требуют комплексной и надёжной защиты на рынке.

В 21 веке интеллектуальная собственность (ИС) становится самостоятельным товаром на рынке инновационной продукции, формируя четвертую корзину товаров наряду с товарами, работами и услугами [1]. ИС является одним из наиболее дорогостоящих активов в коммерческих операциях. Достаточно сказать, что стоимость брендов всемирно известных компаний оценивается в миллиарды долларов. Так, в 2011 г. наиболее высоко оцененными были бренды: Google – 44,3 млрд долл., Microsoft – 42,8 млрд долл., Wal-Mart – 36,2 млрд долл., IBM – 36,2 млрд долл., Vodafone – 30,8 млрд долл. [2].

Мировыми лидерами по защите ИС, её динамике и охвате территорий охраны являются США, Китай и Япония. Россия стабильно занимает места в первой десятке по количеству патентов на изобретения.

Россия является импортером ИС. В то же время Россия является экспортером результатов НИР: объем экспорта результатов НИР за 2010 г. превышает объем импорта почти в 3 раза. В последние годы российский экспорт программного обеспечения (ПО) бурно развивается. По данным некоммерческого партнерства «Руссофт», его объемы выросли почти втрое: с 2,7 млрд. долларов в 2009 году до 7,6 млрд. в 2016-м. Таким образом, информационные технологии (ИТ) неуклонно превращаются в одну из самых доходных статей российского экспорта в целом. Успешное развитие экспорта российского ПО определяется, прежде всего, высоким уровнем российских специалистов и низким курсом рубля [3].

При этом в России практика патентования программ для ЭВМ практически отсутствует. Для сравнения, США патентование компьютерных технологий занимает наибольшую долю (11,11%), в Китае – третью по величине долю (6,22%).

Незначительное число патентов в области компьютерных технологий в России можно объяснить особенностями защиты интеллектуальной собственности. Программы для ЭВМ и базы данных регистрируются и охраняются в Роспатенте как объекты авторского права.

Авторское право, согласно ГК РФ ч.4 ст. 1261, защищает только исходный текст (код) и аудиовизуальные материалы и не даёт защиты

алгоритма, в котором содержатся новые методы и технические решения, обладающие зачастую большой коммерческой ценностью.

Патентные специалисты предлагают осуществлять комплексную защиту программы для ЭВМ путём регистрации её отдельных составляющих, кода как объекта авторского права, алгоритма как изобретения, интерфейса как промышленного образца, логотипа как товарного знака. Алгоритм можно патентовать как способ, например, способ моделирования физических процессов, обработки информации, управления системой. Главное условие – осуществление действий над материальным объектом с помощью материальных средств и получение технического результата, согласно ГК РФ ч.4 ст. 1350.

На примере способа математического и компьютерного моделирования поведения конструкций и изделий авиационной техники в условиях неопределенности входных параметров, по предложенной методике проведён анализ алгоритма на предмет возможности его патентования как изобретения. Определены: материальные объекты и средства, технический результат, порядок выполнения действий.

Примерами изобретений в области компьютерных технологий могут служить:

1. носитель хранения программы, которая, при выполнении на компьютере, заставляет процессор выполнять этапы способа;
2. машиночитаемый носитель для хранения компьютерной программы для выполнения компьютером способа обработки данных;
3. способ вывода информации, содержащий выполнение программы на сервере, которая формирует и передает потоком страницу пользователя в виде интерактивного потокового видео на дисплей, подключенный к серверу через Internet, и т.д.

1. Ю.В. Селивёрстов. Активизация вовлечения интеллектуальной собственности в хозяйственный оборот российских предприятий: теоретико-методологические и организационные аспекты. Автореферат диссертации на соискание учёной степени доктора наук, Белгород, 2013.

2. Г.В. Кузнецова. Международная торговля объектами интеллектуальной собственности // Российский внешнеэкономический вестник. 2013. № 8. С. 35-47.

3. А. Грамматчиков. Кадры решают почти все // Эксперт. 2017. № 14. С. 1024.

ТОЧНОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О СЕГРЕГАЦИИ РАСТВОРЕННОГО В РАСПЛАВЕ ГАЗА ДВИЖУЩИМИСЯ ФРОНТАМИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ**Пильник А.А., Чернов А.А.**

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

E-mail: pilnik@itp.nsc.ru

Известно, что подавляющая часть современных материалов получается кристаллизацией из расплавов. Если не останавливаться на порошковой металлургии и некоторых других технологиях, плавление шихты, ее гомогенизация и последующий переход в твердое состояние - это основной путь. Так как качество получаемых после затвердевания образцов напрямую зависит от их морфологии, умение управлять ею служит ключом к созданию материалов с заданными функциональными характеристиками. И здесь немаловажную роль играют два фактора - это усадочные эффекты и газовая пористость. С одной стороны, все технологические процессы получения твердых материалов в той или иной степени связаны с тем, чтобы минимизировать, или вообще каким-либо образом исключить эти два фактора. С другой стороны, создание материалов с развитой микропористостью позволяет существенно уменьшить их вес, значительно увеличить межфазную поверхность, кардинально изменить их транспортные свойства и т.п. Поэтому создание последовательной и наиболее строгой теории, которая позволила бы все это описать, представляется актуальным.

Известно, что кристаллизация расплавов, быстро приведенных в переохлажденное состояние, происходит в результате флуктуационного зарождения и роста центров кристаллизации. Это реализуется, к примеру, в методе сверхбыстрой закалки из жидкого состояния. В частности, в технологиях газоплазменного напыления, спиннингования и т.п. В ряде работ, посвященных экспериментальному исследованию данного процесса, отмечено, что наличие в затвердевшем материале микропор и трещин может быть связано с усадкой вещества в процессе затвердевания. Так, образование в расплаве даже небольшой доли кристаллической фазы ведет к появлению в еще незакристаллизовавшемся объеме расплава больших растягивающих напряжений и, как следствие, к его интенсивной кавитации, в результате чего затвердевший материал имеет пористую структуру. Размер кристаллических зерен и кавитационных включений при этом существенно зависит от скорости охлаждения расплава.

Другой механизм образования пор при кристаллизации газонасыщенных расплавов обусловлен сегрегацией растворенного в расплаве газа. Механизм

данного процесса заключается в следующем. Так как растворимость газа в твердой фазе существенно меньше, чем в жидкой, газ, растворенный в расплаве, будет вытесняться движущимися фронтами кристаллизации. В результате, он либо отводится, либо «скапливается» вблизи межфазной поверхности. В случае его накопления наступает момент, когда концентрация газа превышает его растворимость в расплаве. Происходит нуклеация и рост газовых пузырьков как в виде отдельных пузырьков, так и в виде ансамбля пузырьков. При этом форма пузырьков может быть как сферической, так и вытянутой (схожей с цилиндрической). В дальнейшем эти пузырьки захватываются твердой фазой, в результате чего затвердевший материал имеет пористую структуру.

Если нуклеации и росту газовых пузырьков в рассматриваемом процессе посвящено достаточно большое число работ, то задача о сегрегации растворенного в расплаве газа рассмотрена весьма фрагментарно. В основном это либо какие-то достаточно грубые приближенные решения, либо численный расчет.

В настоящей работе сформулирована задача о сегрегации растворенного в расплаве газа плоским фронтом кристаллизации с учетом усадки вещества в процессе затвердевания. В приближении квазистационарности найдено аналитическое решение задачи, с хорошей точностью описывающее рассматриваемый процесс для произвольного закона роста кристалла (сравнение найденных приближенного и точных решений в предельных случаях показывает их хорошее соответствие). Получено, что в случае равновесной кристаллизации, когда скорость роста кристалла обратно пропорциональна квадратному корню из времени, решение задачи становится автомодельным и, кроме того, точным. В данном случае на фронте кристаллизации мгновенно устанавливается концентрация, являющаяся функцией скорости роста кристалла, которая остается постоянной в течении всего процесса; толщина диффузионного погранслоя при этом увеличивается пропорционально квадратному корню из времени. Показано влияние усадки вещества на рассматриваемый процесс.

Работа поддержана РНФ (грант № 15-19-10025).

Платонов Д.В.^{1,2}, Минаков А.В.^{1,2}, Дектерев Д.А.^{1,2}, Масленникова А.В.²

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

² Сибирский федеральный университет, Красноярск

E-mail: platonov-08@yandex.ru

Закрученные потоки широко применяются в практических устройствах, поэтому проблеме устойчивости вихревых течений всегда уделяется повышенное внимание. Одним из эффектов, оказывающих кардинальное влияние на структуру вихревого течения является эффект распада вихря (*vortex breakdown*). Экспериментально определено, что условием начала распада является продольный положительный градиент давления. Такой градиент возникает, в частности, при расширении рабочего участка (например, коническом диффузоре).

В частности, данный эффект наблюдается при эксплуатации гидроагрегатов высоконапорных ГЭС. Одним из режимов распада, является структура потока, содержащая прецессирующее спиральное ядро. Прецессия вихревого жгута представляет серьезную опасность для гидротурбинного оборудования в связи с мощными пульсациями потока, которые приводят к сильным вибрациям конструкции гидротурбины и в случае резонанса могут привести к разрушению оборудования.

Как уже было сказано выше максимальные пульсации давления наблюдаются в режимах частичной нагрузки на гидроагрегат, 40-50 % от оптимальных значений. Однако в некоторых работах [1-3] было установлено наличие периодических всплесков, «ударов» в следствии нерегулярной и нестабильной формы вихревого жгута на режимах близких к оптимальному, 70-80% от номинальной мощности. В работах [2,3] выдвинута гипотеза что причиной таких «ударов» может являться образование вихревых колец в следствии перезамыкания прецессирующего вихревого жгута и ударение этих колец о стенку турбины. Так же в этих работах проведен эксперимент на упрощенном модельном стенде, имитирующим работу гидротурбины.



Рис. 1. Фотография экспериментального стенда

В данной работе проведен эксперимент на среднемасштабном гидродинамическом стенде с радиально осевой турбиной (рис.1).

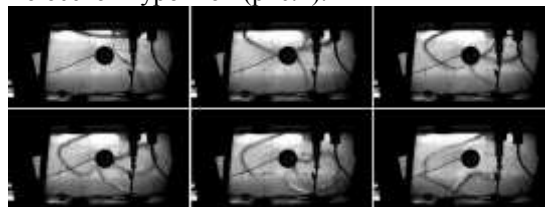


Рис. 2. Вихревая структура за рабочим колесом.

В результате экспериментального наблюдения было зафиксировано образование вихревых колец в следствии перезамыкания прецессирующего вихревого жгута (рис.2). Данное обстоятельство было зафиксировано с помощью высокоскоростной видеосъемки. Срыв вихревых колец приводит к достаточно мощным всплескам пульсаций давления в проточном тракте. В работах [1-3] данное явление было зафиксировано в упрощенной модельной установке и высказано предположение что данное явление может наблюдаться в реальных турбинах, исследование, проведенное рамках данной работы подтверждает данный факт.

Не смотря на все исследования данное явление остаётся крайне мало изученным и представляет очень большой интерес для фундаментальной и прикладной науки и требует дальнейшего изучения.

1. Скрипкин С. Г., Цой М. А., Шторк С. И., Куйбин П. А. // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2016. Т. 11. № 4. С. 25–32.
2. Алексеенко С. В., Куйбин П. А., Шторк С. И., Скрипкин С. Г., Цой М. А. // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 103. вып. 7. С. 516–521.
3. Alekseenko S.V., Kuibin P.A., Shtork S.I., Skripkin S.G., Sonin V.I., Tsoy M.A., Ustimenko A.S. // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2016. Vol. 49. Paper 082025, 8p.

ОСОБЕННОСТИ ГАЗОДИНАМИКИ И ЛОКАЛЬНОЙ ТЕПЛООТДАЧИ В ГАЗОВОЗДУШНЫХ ТРАКТАХ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С НАДДУВОМ

Плотников Л.В.¹

¹ ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург

E-mail: PlotnikovLV@mail.ru

Одна из основных тенденций развития современных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) – повышение их мощности и экономичности. Возможным решением этой задачи является установка на двигатель турбокомпрессора (ТК). В литературе, посвященной теории рабочих процессов поршневых ДВС, установка турбонаддува рассматривается исключительно как эффективный способ повышения массового расхода воздуха через цилиндры двигателя и, соответственно, улучшения его технико-экономических показателей [1-4]. При этом фактически не затрагивается вопрос о влиянии ТК на газодинамические и теплообменные характеристики потока в газозвудушных трактах ДВС. Вместе с тем, очевидно, что установка ТК приведет к существенному изменению тепломеханических характеристик потока газа. В данной работе представлено сравнение экспериментальных данных о газодинамических и теплообменных характеристиках потоков в газозвудушных трактах поршневого двигателя с наддувом и без него.

Для экспериментального исследования процессов во впускных и выпускных системах ДВС были созданы лабораторные установки: натурные модели одноцилиндрового двигателя размерности 8,2/7,1 с наддувом и без. Привод коленчатого вала осуществлялся с помощью асинхронного двигателя, частота вращения которого регулировалась в диапазоне от 600 до 3000 мин⁻¹. Наддув осуществлялся с помощью турбокомпрессора ТКР-6.

Для проведения исследований была создана автоматизированная система сбора данных. Для определения мгновенных значений скорости потока воздуха (w_x) и локального коэффициента теплоотдачи (α_x) использовался термоанемометр постоянной температуры. Чувствительным элементом датчиков термоанемометра в обоих случаях была нихромовая нить диаметром 5 мкм и длиной 5 мм. Подробнее метод термоанемометрирования, применительно к данному исследованию описан в [5]. Определение частоты вращения коленчатого вала и ротора ТК осуществлялось с помощью тахометров. Для определения мгновенных значений статического давления потока в каналах использовались датчики давления фирмы WIKA.

Установлено, что существуют значительные отличия в закономерностях изменения местной скорости потока воздуха во впускных системах двигателей с наддувом и без. В частности, наблюдается более ранний и более резкий рост скорости потока воздуха сразу после открытия впускного клапана в двигателе с наддувом. Это объясняется разными граничными условиями во впускном трубопроводе и цилиндре, которые характерны для ДВС с наддувом и без.

Установлено, что в выпускной системе с ТК значения максимальной скорости потока воздуха меньше, чем в системе без него. В обоих случаях пульсации скорости потока воздуха наиболее ярко выражены при низких частотах вращения коленчатого вала. При этом после закрытия выпускного клапана скорость воздуха в системе на всех режимах не становится равной нулю: наблюдаются ее некоторые флуктуации, что также характерно и для процесса выпуска. Присутствие турбины ТК в выпускной системе приводит к сглаживанию пульсаций скорости потока в течение всего рабочего процесса двигателя. Также необходимо отметить наличие пульсаций давления потока после закрытия клапана в системе выпуска с ТК и без него, которые затухают несколько быстрее при наличии в системе турбокомпрессора.

Обнаруженные значительные отличия в газодинамических характеристиках в газозвудушных трактах ДВС с наддувом и без него оказывают влияние на теплообменные характеристики потока в них.

Выявлено, что при установке ТК происходит снижение интенсивности теплоотдачи в выпускной системе на всех исследуемых режимах. При этом уменьшение максимальных значений локального коэффициента теплоотдачи достигает 20 %.

Обратная закономерность была установлена для впускной системы. Во впускной системе ДВС с наддувом наблюдается возрастание максимальных значений α_x (до 40 %) и его средних значений.

Таким образом, в данном исследовании установлено, что процессы в газозвудушных трактах двигателей с наддувом имеют существенно другую тепломеханическую природу и, соответственно, для их улучшения необходимо разрабатывать специальные меры совершенствования.

Список литературы:

1. Драганов Б. Х., Круглов М. Г., Обухова В. С. Конструирование впускных и выпускных каналов двигателей внутреннего сгорания. Киев: Вища шк. Головное изд-во. 1987. 175 с.
2. Вихерт М. М., Грудский Ю. Г. Конструирование впускных систем быстроходных дизелей. М.: Машиностроение. 1982. 151 с.
3. Кавтарадзе Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 720 с.
4. Шароглазов Б.А., Фарафонов М.Ф., Клементьев В.В. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчет процессов. Учебник / под ред. Засл. Деят. Наук РФ Б.А. Шароглазова. Челябинск: ЮУрГУ, 2010. 382 с.
5. Жилкин Б.П., Лашманов В.В., Плотников Л.В., Шестаков Д.С. Совершенствование процессов в газозвудушных трактах поршневых двигателей внутреннего сгорания: монография; под общ. ред. Ю. М. Бродова. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. 228 с.

*Работа выполнена при поддержке РНФ в рамках
научного проекта 17-69-00002.*

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОРГАНИЧЕСКИХ РАБОЧИХ ТЕЛ ФРЕОНОВОГО РЯДА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЭНЕРГОУСТАНОВОК С ORG - ЦИКЛОМ РЕНКИНА

Поливода Ф.А.

ОАО ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, Москва

E-mail: polivoda@eninnet.ru

В последнее время значительно возрос интерес к использованию энергоустановок, работающих на теплоте низкопотенциальных ресурсов: сточных водах, дымовых газах, технологических отходах, и пр.. В основу энергетического цикла этих установок закладывается паросиловой цикл Ренкина с органическим рабочим телом (ORG-цикл Ренкина). От теплофизических свойств рабочего тела (РТ) во многом зависит оптимизация цикла энергоустановки, её тепловая схема и абсолютная величина теоретического КПД, η_t . Известно значительное количество рабочих тел, однако в массовом производстве промышленностью освоено не более 10-15 товарных марок РТ. Наиболее перспективными для построения ORG-цикла Ренкина для установок с верхней температурой цикла до +60...+150°C являются органические рабочие тела «фреоновой группы», вещества типа $C_nH_mCl_kF_i$. Несмотря на схожесть химической формулы, вещества проявляют внутри группы кардинально противоположные свойства по термодинамическим параметрам, температурной стойкости к разложению, гигроскопичности, пожарной опасности, токсичности для человека и пр.. При проектировании энергоустановок важное значение имеет также цена и доступность органического вещества. Разработчики новых энергоустановок не всегда уделяют повышенное внимание этим аспектам; не проводят детального научного исследования предполагаемого к использованию РТ, а руководствуются лишь общими техническими соображениями.

В настоящей работе проводится аналитическое сравнение наиболее известных и доступных РТ, обладающих низкой токсичностью для человека. Приводятся аналитические зависимости для теплоемкости c_p и теплопроводности λ фреонов, а также анализируются h - lgp -диаграммы с выбранными температурными диапазонами. Это позволяет оценивать КПД паросилового цикла в виде:

$$\eta_t = \frac{\eta_K}{1 + \frac{\eta_K}{\kappa I}} \quad (1)$$

Где η_K – КПД эквивалентного цикла Карно между температурами T_1 и T_2 ; κI - число Клаузиуса (положительный комплекс $\frac{r}{c_p T}$), [1].

Теплоемкость фреонов c_p , Дж/моль·К, в газовом состоянии предложено аппроксимировать зависимостью в виде полиномов:

$$c_p = \sum_{i=0}^n A_i T^i \quad (2)$$

а коэффициент теплопроводности $\lambda = \lambda_{\text{фр.}} m \Phi(\tau)$ (3)

где $m = \frac{c_v}{c_p}$; $\Phi(\tau) = \sum_{i=1}^k B_i \tau^i$ - полином температурной функции; $\tau = \frac{T}{T_{\text{фр.}}}$ - приведенная температура

[2]; $T_{\text{фр.}}$ - критическая температура. В частности, в [2] для фреона R-113 рекомендованы следующие значения коэффициентов полинома ($n=4$) A_i в формуле (2):

$$A_0 = 22.57892; A_1 = 0.5128; A_2 = -7.62929 \cdot 10^{-4}; A_3 = 5.4971 \cdot 10^{-7}; A_4 = -1.561 \cdot 10^{-10}.$$

Для предварительного выбора температурного режима энергоустановки и сравнения η_t , полученного по формуле (1), целесообразно воспользоваться h - lgp -диаграммой, полученной из других источников, например, [3]. Величину теоретического КПД цикла η_t можно оценить, исходя из графического построения цикла, на основе энтальпий h_1, h_2, h_3 соответственно, для насыщенного пара РТ, поступающего в турбину, «мятого» пара после турбины и конденсата, сжатого насосом. h_2' – энтальпия конденсата РТ перед насосом. Имеем:

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2 - (h_3 - h_2')}{h_1 - h_2} \quad (4)$$

При правильном построении термодинамического цикла, расхождения значений η_t , полученных по формулам (1) и (4) не должно превышать 3-5 %.

Как показали проведенные исследования, наиболее перспективными, например, для модернизации водогрейных котельных [4] и сооружения на них электрогенерирующих установок, следует считать фреоны марок: R-11, R-21, R-216 и R-113. Наибольший теоретический КПД может быть достигнут на рабочем теле R-11. Однако, согласно Монреальскому Протоколу, к которому присоединилась и Россия, в настоящее время он не рекомендован для сооружения новых энергоустановок; производство R-11 ограничено. Несомненным эксплуатационным преимуществом вышеназванных фреонов является возможность заправки силового контура непосредственно из открытой тары (без вакуумирования заправочного сосуда), а также возможность поставки с химзавода в заводской таре. Например, R-113 поставляется в алюминиевых бочках емкостью 100, 110 и 250 литров. Точка инверсии $t_{\text{и.н.}}$ лежит у этих фреонов выше +23°C, что допускает заправку контура при температуре окружающей среды ниже +10...+15°C простыми техническими средствами.

1. И.И. Новиков, К.Д. Воскресенский. Прикладная термодинамика и теплопередача // М.: Энергоатомиздат, 1977. 349 с.
2. О.Б. Цветков. Теплопроводность холодильных агентов // Л.: ЛГТУ, 1984. 207 с.
3. Термодинамические h - lgp диаграммы для хладагентов. М.: Ависанко, 2003. -50 с.
4. Поливода Ф.А., Щербаков В.П., Владимиров М.А., Шатров Л.А. Методы энергосбережения в системах теплоснабжения городов на базе создания источников электрической генерации, работающих по ORG- циклу Ренкина // Промышленная энергетика. 2016. №6. С. 6-12.

Работа поддержана РФФИ, грант № 16-08-00438

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЕРЕНОСА НАНОЖИДКОСТЕЙ С УГЛЕРОДНЫМИ НАНОМАТЕРИАЛАМИ

Пряжников М.И.^{1,2}, Минаков А.В.^{1,2}, Гузей Д.В.^{1,2}

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск

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

E-mail: arrivent@yandex.ru

Наравне с изучением наножидкостей с частицами металлов (золото, медь), оксидов металлов (окись алюминия, окись меди), карбида кремния [1-4] ряд научных исследований направлены на использование наноалмазов в качестве частиц, улучшающих теплопроводность теплообменных жидкостей (воды, масла, этиленгликоля)

Также представляется весьма интересным использование углеродных нанотрубок (УНТ). Наножидкости с углеродными нанотрубками привлекли большое внимание исследователей из-за их очень высоких теплопроводных свойств. Было показано, что добавка очень малого количества (0.01 об. %) УНТ позволяет в разы повысить коэффициент теплопроводности наножидкости [5-6]. Теплопроводность углеродных нанотрубок и наножидкостей с ними в настоящее время активно изучается, однако проблема все еще остается открытой. Причина этого частично связана со сложностью измерений, частично с неопределенностью объекта, например, параметрами трубки. Известна высокая чувствительность транспортных характеристик углеродных нанотрубок к условиям их синтеза и т.д. Помимо тепловых свойств наножидкостей с УНТ большой интерес представляет поведение вязкости. Нанотрубку нельзя рассматривать как классическую наночастицу, поскольку отношение длины трубки к ее диаметру может превышать 1000. Из-за этого коэффициенты переноса такой наножидкости могут сильно отличаться от наножидкостей с преимущественно сферическими частицами. В частности, могут существенно изменяться реологические свойства таких наножидкостей. Реальное же использование наножидкостей требует ясного представления о всех этих характеристиках.

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование коэффициента вязкости и коэффициента теплопроводности наножидкостей с углеродными нанотрубками, а также с алмазографитовой шихтой (ультрадисперсный алмазографитовый порошок УДП-АГ), полученным детонацией взрывчатых веществ во взрывной камере [7], и с ультрадисперсными наноалмазами (УДА), выделенными из УДП-АГ.

Детальное описание установки для регистрации теплопроводности и ее тестирования приведено в работе [8]. Методика измерения коэффициента теплопроводности основана на нестационарном методе нагреваемой проволоки [9]. Итоговая относительная погрешность измерения коэффициента теплопроводности данной методикой составляет порядка 2 %.

Вязкость суспензий измеряли с помощью ротационного вискозиметра: Brookfield DV2T с адаптером для малой вязкости ULA(0). Описание установки и ее

апробация для измерения вязкости наносуспензий приведены в работе [10]. Погрешность измерения коэффициента вязкости была не более 2 %.

В качестве базовой жидкости использовалась дистиллированная вода, этиленгликоль и моторное масло. Массовая концентрация наночастиц варьировалась в диапазоне от 0.05 до 10 %. Для приготовления наножидкостей использовался стандартный двухшаговый метод. Необходимое количество порошка добавлялось в жидкость, после чего полученная суспензия тщательно механически перемешивалась. Чтобы разрушить конгломераты наночастиц, суспензии подвергались обработке в ультразвуковой ванне «Сапфир ТЦ-10338».

В работе получены зависимости коэффициентов вязкости и теплопроводности наножидкостей с наноалмазами, с алмазографитовой шихтой и с углеродными нанотрубками от концентрации наночастиц. Также проведено исследование влияния свойств базовой жидкости на коэффициенты переноса.

1. Chopkar M., Das P.K., Manna I. Synthesis and characterization of nanofluid for advanced heat transfer applications // Scripta Materialia. 2006. V. 55. No. 6. P. 549-552.
2. Chen G., Yu W., Singh D. Application of SAXS to the study of particle-size-dependent thermal conductivity in silica nanofluids // Journal of Nanoparticle Research. 2008. V. 10. P. 1109-1114.
3. Mints H.A., Roy G., Nguyen C. T., Doucet D. New temperature dependent thermal conductivity data for water-based nanofluids // J. Thermal Science. 2009. V. 48. P.363.
4. Eastman J.A. et al. Anomalous increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles // J. Applied Physics Letter. 2001. V. 78. P. 718.
5. Yu. W., France D.M., Choi S.U.S., Routbort J.L. Review and assessment of nanofluid technology for transportation and other application // Argonne National Laboratory. 2007. No. ANL/ESD/07-9. P. 78.
6. Kim P., Shi L., Majumdar A., McEuen P.L. Thermal Transport Measurements of Individual Multiwalled Nanotubes // Physical review letters. 2001. V. 87. No. 215502. P. 1-4.
7. Ставер А.М., Губарева Н.В., Лямкин А.И., Петров Е.А. Ультрадисперсные алмазные порошки, полученные с использованием энергии взрыва // Физика горения и взрыва. 1984. Т. 20, № 5.
8. Минаков А.В. и др. Измерение коэффициента теплопроводности наножидкостей методом нагреваемой нити // Инженерно-физический журнал. 2015. Т. 88, № 1. С. 148-160.
9. Е.С. Платунов, И.В. Баранов, С.Е. Буравой, В.В. Курепин. Теплофизические измерения: учебное пособие / Под ред. Е.С. Платунова. СПб: СПбГУНиПТ, 2010. 738 с.
10. Рудяк В.Я., Минаков А.В. и др. Экспериментальные данные о зависимости вязкости наножидкостей на основе воды и этиленгликоля от размера и материала частиц // Доклады Академии наук. 2016. Т. 467. № 3. С. 289-292.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки и науки РФ, в рамках базовой части государственного задания ФГАОУ ВО «СФУ» (проект №3100).

Известно, что частичные разряды в трансформаторном масле являются одной из причин постепенного разрушения бумажно-масляной изоляции. Механизмы развития и протекания частичных разрядов в газовых включениях твердой изоляции исследовались ранее [1], в то время, как механизмы протекания частичных разрядов (ЧР) в газовых полостях до сих пор малоизученны [2]. Поэтому целью данной работы является исследование поведения газовых пузырьков в трансформаторном масле под действием переменного напряжения.

Экспериментальная установка включала в себя экспериментальную ячейку, схемы электрической и оптической регистрации, помещенные в металлический заземленный шкаф. Оптическая регистрация производилась с помощью скоростной фотокамеры Casio EX-F1. В качестве источника света использовалась лазерная указка. Экспериментальная ячейка (рис.1), состояла из корпуса ячейки, выполненного из оргстекла, с окнами, выполненными из оптического стекла, двух плоских электродов, а так же системы подачи газа в объем трансформаторного масла. Ячейка устанавливалась на оптическую скамью для регулировки.

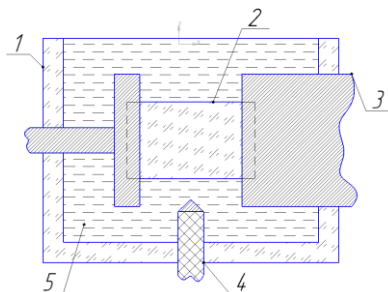


Рис. 1. Эскиз экспериментальной ячейки

В ходе работы был выявлен эффект деформации пузырька воздуха под воздействием переменного электрического поля амплитудной напряженностью 30 кВ. Деформация пузырька происходила с удвоенной частотой, без ЧР, в полном соответствии с модулем мгновенной напряженности поля. К примеру, пузырек, диаметром 1,24 мм в момент максимального напряжения удлинялся до 1,8 мм (рис.2). Так же экспериментально была определена скорость всплывания пузырька этого размера $V=11.6$ см/с.



Рис. 2. Пузырек в момент, соответствующий амплитудному значению напряжения.

Для экспериментов по изучению ЧР пузырьки заполняли газом с меньшей электрической прочностью – гелием. На рисунке 3 представлен ряд кадров, описывающих развитие ЧР в пузырьке гелия диаметром 1.57 мм при напряжении 12 кВ.

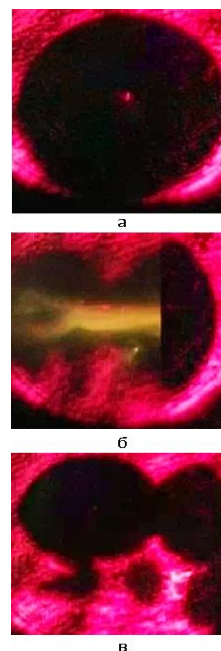


Рис. 3. Пузырек гелия в начальный момент (а) В момент развития ЧР (б) и после ЧР (в).

Было выявлено, что возникновение ЧР в этих пузырьках всегда приводило к разрыву пузырька. На наш взгляд это может быть связано с тем, что после образования газоразрядной плазмы в пузырьке в момент развития ЧР заряды в плазме разделяются, положительные заряды движутся в сторону отрицательного электрода, отрицательные – в сторону положительного электрода, затем они оседают на стенках. Кулоновская сила начинает действовать на стенки пузырька, вызывая его резкое удлинение, а неустойчивость удлиненного пузырька приводит к его разрыву. Оценки деформации дают значения более двух.

Отметим, что ЧР во всплывающих пузырьках не соответствует кривой Пашена, что обусловлено дефицитом иницирующих электронов в пузырьке.

1. Van Brunt R. J. Physics and chemistry of partial discharge and corona – recent advances and future challenges // IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. 1994. № 94. P. 29-70.
2. М.Х. Гаджиев, Э.Х. Исакаев, А.С. Тюфтяев, П.Л. Акимов, Д.И. Юсупов, Ю.М. Куликов, В.А. Панов Электрический пробой трансформаторного масла с пузырьками элегаза и воздуха // Журнал технической физики. 2015. том 85, №7. С. 156-158.

Работа поддержана РНФ (грант № 16-19-10229).

Рубцов И.А., Пруэл Э.Р., Тен К.А., Кашкаров А.О., Кременко С.И.

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

E-mail: rubtsov@hydro.nsc.ru

В современном мире проблема борьбы с электростатическим электричеством в самых разных сферах жизнедеятельности человека становится все более и более актуальной, в частности большой интерес представляет изменения проводимости взрывчатых веществ, так как борьба со скапливающимся статическим зарядом в этом случае имеет непосредственное отношение к безопасности производства и эксплуатации взрывчатого вещества.

Мы использовали одностенные углеродные нанотрубки TUBALL™ COAT_E, произведенные компанией OCSiAl. Так как на сегодняшний день не существует методик получения нанотрубок с одинаковой хиральностью, результатом синтеза была совокупность продуктов, являющихся проводниками и полупроводниками. Введение примесей изменяет характер проводимости исходного вещества. Конкретно в нашем случае введение полимерных материалов (УНТ) существенно изменяет характеристики полученного композита. Даже небольшого количества УНТ (менее 1%) достаточно, чтобы проводимость полимера выросла на несколько порядков.

Проводимость получаемого композита очевидным образом зависит от однородности распределения введенных УНТ во взрывчатый материал (ВМ), поэтому проводилась перекристаллизация ВМ путем его растворения в ацетоне с последующим осаждением на УНТ.

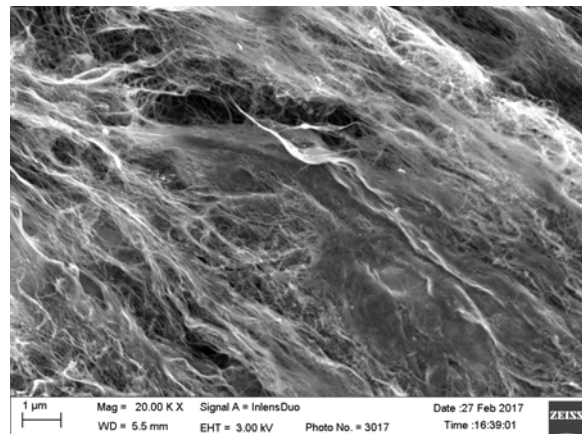


Рис. 1. Фотографии сканирующего электронного микроскопа заряда тротила с внедренными УНТ.

В работе разработана и оптимизирована методика внедрения УНТ во взрывчатые материалы на примере тротила, а также исследована однородность полученного материала. Выявлен факт возникновения проводимости изначально не проводившего тротила и тэна при добавлении в них 0.2 – 1% УНТ. Проводимость полученного композита составила $\sim 0.02 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$. В работе также измерена проводимость композита от концентрации внедренных УНТ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Новосибирской области в рамках научного проекта № 17-42-543100.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БЛИЖНЕЙ ОБЛАСТИ КОЛЬЦЕВОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУИ

Рыженьков В.О.^{1,2}, Мулладжанов Р.И.^{1,2}

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

² Новосибирский государственный университет

E-mail: v.o.ryzhenkov@gmail.com

Струи жидкости и газа, вытекающие из кольцевого канала, характеризуются наличием центральной зоны рециркуляции за телом обтекания, используемой в горелочных устройствах для стабилизации пламени. В данной работе исследуется течение из осесимметричного канала, в котором отношение внешнего диаметра к внутреннему равно 2. Число Рейнольдса, построенное по внешнему диаметру и среднерасходной скорости жидкости в канале, соответствует 8900, которое выбрано для возможности валидации входных условий на литературных данных [1]. Входной профиль скорости определяется полностью развитым турбулентным течением в длинном канале, вытекающим в затопленное жидкостью свободное пространство.

В эксперименте [2] были обнаружены низкочастотные пульсации зоны рециркуляции, которые в данной работе исследуются при помощи трехмерного численного моделирования методом крупных вихрей (Large-eddy simulation, LES) и кода Nek5000. Эта вычислительная программа основана на методе спектральных элементов для пространственной дискретизации уравнений Навье-Стокса [3] и полиномов Лежандра высокого порядка. Производная по времени дискретизируется конечно-разностной схемой третьего порядка аппроксимации. В задаче моделировались две вычислительные области. Первая представляла собой кольцевой канал длиной $2.5D$, где D – это внешний диаметр, с периодическими граничными условиями. Вторая область, показанная на Рис. 1, длиной $18D$ моделирует непосредственно истечение кольцевой струи в затопленное пространство. Вычислительные сетки насчитывают 5.12 и 19.5 млн. узлов, соответственно. Сравнение радиальных профилей осредненных по времени продольной скорости и различных компонент тензора Рейнольдсовых напряжений (показана только одна компонента) показывают отличное совпадение с данными прямого численного моделирования внутри канала [1], Рис. 2. Кроме того, на Рис. 2 показаны также радиальные профили на различном удалении от сопла. Длина области рециркуляции, которая определяется точкой стагнации, равна $1.5D$. Профиль пульсаций около сопла имеет максимум в двух слоях смещения – внутреннем и внешнем. В докладе помимо осредненных характеристик будет исследоваться динамика рециркуляционной зоны, что позволит определить вклад низкочастотных пульсаций в общий баланс турбулентной кинетической энергии.

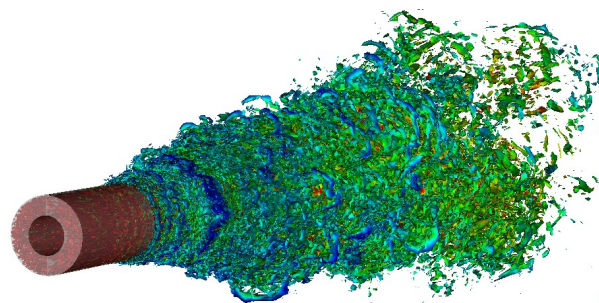


Рис. 1. Визуализация вихревых структур в кольцевой струе при помощи изоповерхности λ_2 -критерия, окрашенной в величину мгновенной продольной скорости.

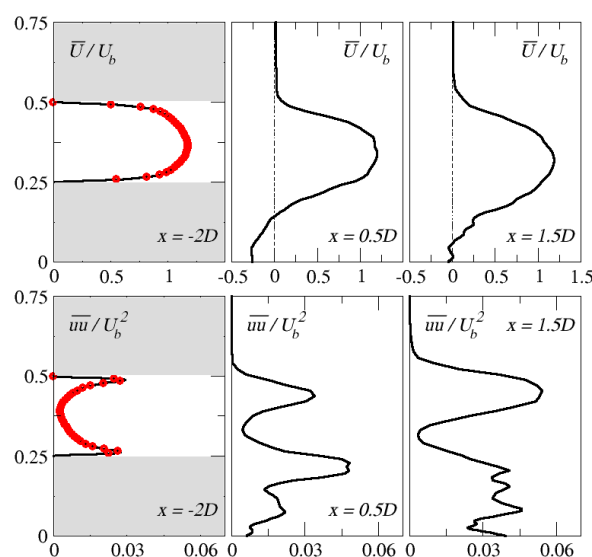


Рис. 2. Радиальный профиль осредненной по времени продольной скорости и пульсаций на разных расстояниях от сопла: $x=-2D$ (подводящий канал), $0.5D$, $1.5D$. Символами показаны данные прямого численного моделирования из работы [1].

1. S.Y. Chung, G.H. Rhee, H.J. Sung. Direct numerical simulation of turbulent concentric annular pipe flow. International Journal of Heat and Fluid Flow. 2002. V.23, P. 426–440
2. M. Vanierschot, E. Van den Bulck. Experimental study of low processing frequencies in the wake of a turbulent annular jet. Exp. Fluids. 2011. V. 50, No. 6. P. 189–200.
3. S.G. Kerkemeier, P.F. Fischer, J.W. Lottes. Nek5000: Open source spectral element CFD solver: <http://nek5000.mcs.anl.gov>. 2008.

ИНТЕНСИВНОСТЬ ВЕРТИКАЛЬНОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ОБМЕНА В ВЕРХНЕМ СЛОЕ ПИКНОКЛИНА ЧЕРНОГО МОРЯ ВОКРУГ КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА

А.С. Самодуров¹, А.М. Чухарев¹

¹ Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь

E-mail: anatol_samodurov@mail.ru

Экспериментальные данные о микроструктуре полей скорости течения, температуры и электропроводности собраны при помощи зонда-турбулиметра «Сигма-1». При измерениях, зондирования осуществляются в режиме свободного падения зонда со скоростью около 0,7 м/с от поверхности до максимальной глубины 300 м. В слоях с существенным вкладом температуры в величину градиента плотности при спектральном анализе предпочтение отдавалось скалярной величине (пульсации температуры) по сравнению с векторной (пульсации скорости). В слоях с малыми градиентами температуры, напротив, расчеты проводились преимущественно по пульсациям скорости. Результаты обработки позволяют судить о характере пульсационного движения (волновой или турбулентной природы), о степени энергоснабжения мелкомасштабной турбулентности и, наконец, в совокупности с другими параметрами исследуемого слоя – о коэффициентах вертикального турбулентного обмена.

Главным источником турбулентности в стратифицированном слое в исследуемом районе являются квазиинерционные, близкие к минимуму частоты, внутренние волны, обрушение которых приводит к образованию турбулентных пятен. Частота образования и размер этих пятен и определяет интенсивность вертикального перемешивания и обмена в стратифицированных слоях. Расчет толщины пятна L основан на анализе структуры спектров первых разностей флуктуаций температуры, измеренных в океане. Ранее было показано, что эффективный вертикальный масштаб природных турбулентных пятен соответствует вертикальному масштабу устойчивого минимума в мелкомасштабной области спектра [1]. Этот подход позволяет найти выражение для диссипации турбулентной энергии и коэффициента турбулентной диффузии в широком интервале изменчивости N с привлечением полуэмпирической модели, основанной на энергетическом балансе в системе [2].

Для достижения поставленной цели, во время проведения 87 рейса НИС «Профессор Водяницкий» (30.06-18.07.2016 г.), в указанном районе были проведены исследования для выявления зависимости коэффициента вертикальной турбулентной диффузии K от частоты плавучести в стратифицированном слое 20-80 м. Соответствующая зависимость K в верхней части основного пикноклина (ниже максимума N) имеет вид [3]:

$$K(N_c) \cong 9,36 \cdot 10^{-5} (\tilde{N}_c)^{-1} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}. \quad (1)$$

Здесь $\tilde{N}_c = N_c \cdot (\text{ц/час})^{-1}$ безразмерна, а N_c – циклическая частота плавучести. На рис. 1 представлено рассчитанное пространственное распределение K .

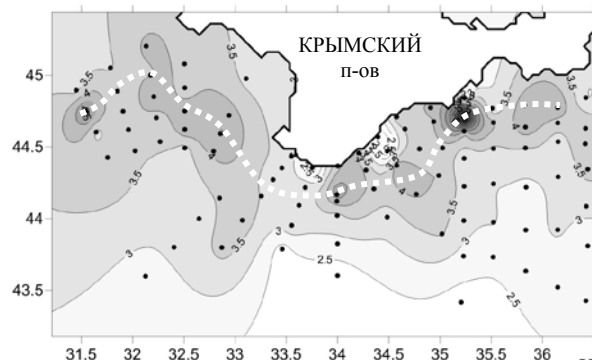


Рис. 1. Горизонтальное распределение коэффициента вертикальной турбулентной диффузии K для слоя 20-80 м.

Белая штриховая линия близка к линии разграничения шельфа и континентального склона. Черные точки – расположение станций зондирования.

Анализ данных измерений показывает нетривиальный результат: максимумы коэффициента диффузии расположены в зоне сопряжения шельфа и континентального слоя (темный фон). В шельфовой зоне и в глубоководной области уровень значений K в том же слое снижается. Формально это означает, что частота плавучести в зоне сопряжения в среднем меньше по сравнению с прилегающими областями. Для объяснения этого факта можно привлечь результаты работы [4]. Там показано, что рельеф дна в зоне сопряжения приводит к существенному уровню (по сравнению с прилегающими областями) обрушений и потерь энергии отражающихся от него квазиинерционных волн. Это должно сопровождаться усилением диссипации энергии и ослаблением стратификации в указанной зоне. Учитывая результаты приведенного выше анализа, можно утверждать, что в конечном итоге это должно привести к формированию уравновешенной полосы с ослабленной стратификацией в зоне сопряжения, которая и была обнаружена здесь.

1. Gregg M.C. Scaling turbulent dissipation in the thermocline // J. Geophysical Research. 1989. 94. № C7. P. 9686–9698.
2. Самодуров А.С., Любичкий А.А., Пантелеев Н.А. Вклад опрокидывающихся внутренних волн в структурообразование, диссипацию энергии и вертикальную диффузию в океане // Морской гидрофизический журнал. 1994. №3. С. 14–27.
3. Самодуров А.С. Взаимодополняемость различных подходов для оценки интенсивности вертикального турбулентного обмена в естественных стратифицированных бассейнах // Морской гидрофизический журнал. 2016. № 6. С. 37–48.
4. Самодуров А.С., Чухарев А.М., Носова А.В., Глобина Л.В. Интенсификация внутренних волн в зоне сопряжения шельфа и континентального склона как фактор интенсификации вертикального обмена // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2013. 6. №2. С. 12–24.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2014-0010

Михеев Н.И.^{1,2}, Саушин И.И.¹¹ Казанский научный центр РАН² Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ

E-mail: n.miheev@mail.ru

Течения с положительным продольным градиентом давления (ППГД) часто встречаются в технике, например, в диффузорном канале или при обтекании аэродинамического профиля. ППГД помимо внесения изменения в кинематику и динамику турбулентного пограничного слоя при определенных условиях является инициатором его отрыва.

Структура пограничного слоя с ППГД зависит сразу от нескольких чисел динамического подобия. Наибольшее внимание исследователей всегда было сконцентрировано вокруг предложенного Френсисом Клаузером в 1954 году безразмерного параметра градиента давления, который описывает отношение си-

лы давления к силе трения $\beta = \frac{\delta^*}{\tau_w} \frac{dP}{dx}$, где δ^* – тол-

щина вытеснения, τ_w – касательное напряжение на стенке, dP/dx – градиент статического давления. В случае равновесного пограничного слоя, для которого $\beta = \text{const}$, используют безразмерный параметр уско-

рения $K = \frac{\nu}{U_1^2} \frac{dU_1}{dx}$, где U_1 – локальная скорость набе-

гающего потока, ν – кинематическая вязкость. В дополнении к этим двум параметрам также оценивают используемое для описания безградиентных течений число Рейнольдса Re_τ , рассчитанное по величине динамической скорости на стенке.

Ряд экспериментальных работ по изучению течений с ППГД точечными методами измерений Ludwig & Tillman (1950), Perry & Shofield (1973), Cutler and Johnston (1989), Marusic and Perry (1995), Nagano et al. (1998), Elsbery et al. (2000), Perry et al. (2002), Nagib et al. (2003), Aubertine and Eaton (2005), Maciel et al. (2006) затронул некоторые частные случаи таких течений и приоткрыл физическую основу процессов в них. К сожалению, точечные методы измерения не позволяют получить полную информацию о когерентных структурах и членах уравнения баланса энергии турбулентности, которая крайне необходима для аналитического описания законов движения и моделей турбулентности для численного решения системы RANS.

Использование в качестве инструмента измерения полевого оптического метода PIV (Kahler et al. (2016), Atkinson et al. (2016), Willert et al. (2016)) совсем недавно позволило получить информацию о динамике когерентных структур в ряде диффузорных течений. Однако известные ограничения по пространственному разрешению метода PIV пока оставляют открытым вопрос об исследовании мелкомас-

штабных характеристик турбулентности в течениях с ППГД.

В данной работе для исследования турбулентного пограничного слоя с ППГД применен другой полевой оптический метод измерения Smoke Image-Velocimetry (SIV) [1]. Исследования безградиентного турбулентного пограничного слоя показали преимущество метода SIV перед PIV по величине масштаба измерения и позволили с достаточной точностью выполнить оценку генеративного и диссипативного членов уравнения сохранения турбулентной энергии.

Объектом исследования в данной работе являлся пограничный слой на плоской стенке одностороннего диффузионного канала длиной 410 мм с углом раскрытия 4.6° , $\beta=0-5.9$, $K=6.55E-06$ и $Re_\tau=204-280$.

Проведен анализ влияния ППГД на осредненные по фазовому углу профили скорости и моментов второго порядка её флуктуаций в нескольких поперечных сечениях диффузора (см. рис. 1). Результаты измерений хорошо согласуются с литературными данными, полученными на основе одноточечных измерений, но существенно расширяют оценки взаимных пространственно-временных корреляций.

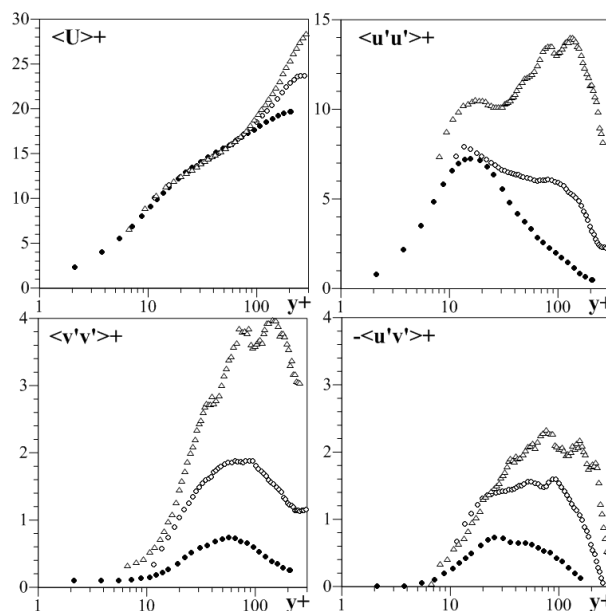


Рис. 1. Профили характеристик по длине канала с ППГД. ●- $\beta=0$, $Re_\tau=214$; ○- $\beta=2.7$, $Re_\tau=231$; △- $\beta=5.9$, $Re_\tau=281$

1. N. I. Mikheev and N. S. Dushin. A Method for Measuring the Dynamics of Velocity Vector Fields in a Turbulent Flow Using Smoke Image-Visualization Vide // Instruments and Experimental Techniques, 2016, Vol. 59, No. 6, pp. 880–887.

АПЕРИОДИЧЕСКИЕ ПУЛЬСАЦИИ ДАВЛЕНИЯ ПРИ РАБОТЕ ГИДРОТУРБИНЫ В НЕОПТИМАЛЬНОМ РЕЖИМЕ

Скрипкин С. Г.¹, Цой М. А.¹, Куйбин П. А.¹

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

E-mail: skripkin.s.g@gmail.com

В настоящее время, гидроэлектростанции, интегрированные в электрические сети, помимо производящей, выполняют важную регулирующую функцию, обеспечивая плавные изменения в нагрузке на сеть. Это обеспечивается за счёт работы гидравлических турбин вне оптимального режима. При частичной нагрузке поток за рабочим колесом гидротурбины имеет остаточную закрутку, что в совокупности с расширением проточного тракта в отсасывающей трубе приводит к формированию крупномасштабной зоны рециркуляции и прецессирующего спиралевидного вихревого ядра (ПВЯ), являющегося одним из основных источников пульсаций в гидродинамическом тракте. Наличие ПВЯ негативным образом сказывается на надежности, долговечности и эффективности гидротурбин.

Детальное описание и изучение физического механизма, приводящего к формированию ПВЯ, является основополагающим для разработки методик управления потоком, основная задача которых уменьшить его влияние на проточный тракт при сохранении эффективности работы турбины. Явление ПВЯ освещается в литературе достаточно широко и долго [1-2], однако ввиду большого разнообразия геометрий турбин и отсасывающих труб, а также широкого диапазона режимов, в которых турбине приходится работать при регулировании сети, задача по исследованию ПВЯ до сих пор актуальна. Зачастую низкочастотные пульсации давления, частота которых лежит в диапазоне 0,2 - 0,4 от частоты вращения рабочего колеса, связывают с наличием прецессирующего спирального вихря, однако природа пульсаций давления с частотой на порядок выше, или аperiодические пульсации давления, регистрируемые в режимах близких к оптимальному, остаются малоизученными. В работе [3] показано, что одним из источников аperiодических возмущений в проточном тракте турбины может быть вихревое кольцо, формирующееся в результате неустойчивости ПВЯ в процессе вихревого перезапуска.

В данной работе расширены экспериментальные данные по режиму течения с аperiодическими пульсациями давления. В ходе экспериментов, в отличие от работы [3], рабочее колесо модельной турбины вращалось не свободно, а вынужденно, что позволило, фиксируя расход, получить различные режимы течения.

Количественная информация о структуре течения была получена при варьировании скорости вращения рабочего колеса с использованием ЛДА техники. На основе ЛДА данных для каждого режима был рассчитан интегральный параметр крутки потока S , а также построены зависимости частоты прецессии вихря от скорости вращения рабочего колеса. На рисунке 1 представлен сигнал с датчика давления на

стенке отсасывающей трубы. При скорости вращения рабочего колеса 800 об/мин, интегральный параметр крутки $S = 1,1$, а при скорости вращения 450 об/мин $S = 0,4$. Таким образом, в потоке с большим параметром крутки формируется более развитый вихревой жгут, генерирующий значительные пульсации давления. При малой закрутке потока также формируется спиралевидный вихрь с более высокой частотой прецессии, пульсации от которого практически не регистрируются датчиком на стенке, тем не менее, датчик регистрирует аperiодические всплески давления.

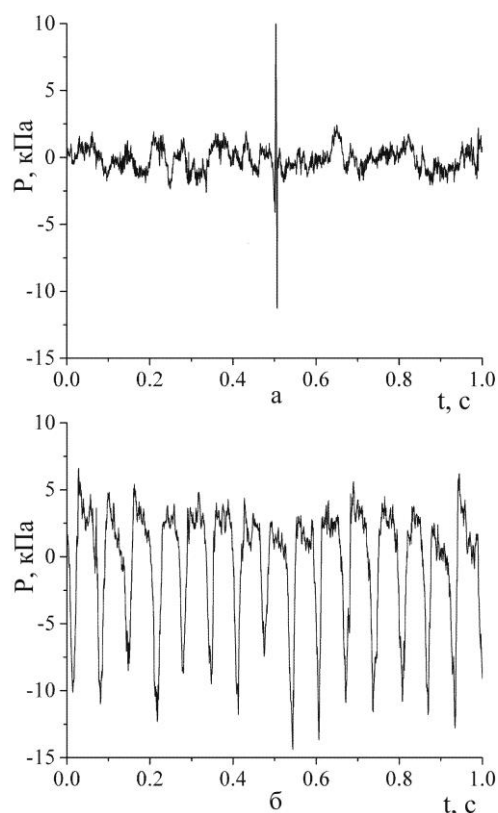


Рис. 1. Пульсации давления в конусе отсасывающей трубы. Расход $Q = 70 \text{ м}^3/\text{ч}$, скорость вращения рабочего колеса (а) 450 об/мин, (б) – 800 об/мин.

Список литературы:

1. Nishi M., Liu S. An outlook on the draft-tube-surge study // Intern. J. Fluid Machinery and Systems. 2013. V. 6, No. 1. P. 33–48.
2. Nicolet C., Zobeiri A., Marzewski P., Avellan F. 2013 Experimental Investigations on Upper Part Load Vortex Rope Pressure Fluctuations in Francis Turbine Draft Tube // Int. J. Fluid Mach. Syst. 2013. V. 4, No. 1. P. 179–190.
3. Alekseenko S.V., Kuibin P.A., Shtork S.I., Skripkin S.G., Sonin V.I., Tsoy M.A., Ustimenko A.S. A novel scenario of aperiodical impacts appearance in the turbine draft tube // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2016. V. 49, No. 8, Paper No. 082025. 7 p.

Работа поддержана РНФ (грант № 16-19-00138)

Панов Д.О.¹, Смирнов Е.М.¹, Егоров С.В.², Лобачев М.П.²¹ Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого, Санкт-Петербург² ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-ПетербургE-mail: aero@phmf.spbstu.ru

При проектировании водометных двигателей, получающих сегодня все большее распространение в практике судостроения, пристальное внимание уделяется определению условий, при которых в насосе разрабатываемого двигателя развиваются кавитационные процессы. Традиционные методы отработки конструкции двигателя посредством проведения испытаний в кавитационных трубах в последнее время активно дополняются все возрастающими возможностями современных технологий вычислительной гидродинамики.

В докладе представляются результаты численного моделирования кавитационных явлений в водометном двигателе насосного типа (ВДНТ), разработанном в Крыловском государственном научном центре и представляющим собой (см. рис. 1) двойную лопастную соосную систему с подвижной и неподвижной частями, помещенными в насадку (кожух).

Расчеты выполнены с применением конечно-объемного кода второго порядка точности по пространству и времени, как на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса в нестационарной формулировке (URANS), так и по двум вихреразрешающим подходам: методу моделирования крупных вихрей (LES-WALE) и методу моделирования отсоединенных вихрей (в варианте IDDES). Во всех случаях для предсказания кавитационных явлений использовалась полуэмпирическая модель кавитации: уравнения «односкоростной» модели двухфазного течения дополнялись уравнением переноса паровой фазы, с полуэмпирическими выражениями для обменных (источниковых) членов.

Представляются результаты многовариантных параметрических расчетов, проведенных на основе метода URANS для условий, соответствующих испытаниям ВДНТ в кавитационной трубе при разных значениях параметра кавитации, с варьированием значений поступи в широких пределах. Расчеты выполнялись с использованием SST модели турбулентности Ментера, с активированной поправкой на кривизну и вращение. Расчетные значения основных гидродинамических характеристик – коэффициентов полного упора и момента на рабочем колесе (РК), – сопоставляются с данными экспериментов. Проводится анализ картин течения, с акцентом на особенности предкавитационного и кавитационного обтекания концевых кромок лопастей РК.

В литературе кавитация, возникающая в области зазора (щели) между торцом лопасти РК и поверхностью кожуха, подразделяется на три типа: собственно щелевую кавитацию (gap cavitation), кромочно-лопастную кавитацию (blade-end cavitation) и кавитацию в концевом вихре (leakage vortex cavitation). Кавитация в концевом вихре, которая в литературе ха-

рактеризуется как наиболее сложная, обусловлена формированием области низкого давления в ядре интенсивного вихря, развивающегося при взаимодействии перетекающего через зазор потока (leakage flow) с основным потоком через межлопаточный канал. Имеющиеся в литературе экспериментальные данные, полученные относительно недавно с применением высокоскоростных фотокамер, свидетельствуют о том, что концевой вихрь сильно нестационарен, а кавитационная зона, образующаяся в его ядре, может разрываться по длине на отдельные фрагменты. В области между кромкой лопасти и концевым вихрем наблюдаются кавитационные образования меньших масштабов. Очевидно, что воспроизведение данных явлений возможно лишь на основе вихреразрешающих подходов к моделированию турбулентных течений.

Представляемые в докладе результаты расчетов с применением вихреразрешающих подходов получены на нескольких сетках, наиболее подробная из которых включала 15,6 млн. ячеек. При этом наибольшая часть ячеек была сосредоточена в «клиновидной» области, охватывающей концевой вихрь и его окрестность. В расчетах по методу LES на использованных сетках разрешаются многие наблюдаемые в недавних экспериментах «тонкие» детали течения в щелевом зазоре и в концевом вихре, включая сложную структуру кавитационных образований в ядре вихря и рядом с ним (см. рис. 1).

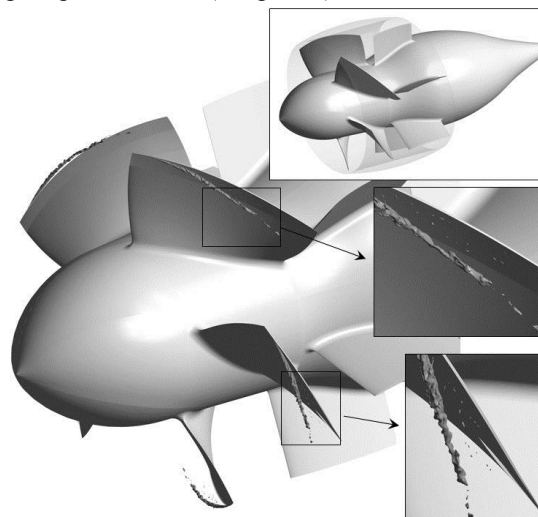


Рис. 1. Геометрия водометного двигателя и кавитационные образования в ядре и в окрестности концевой вихря

Метод IDDES на тех же сетках позволяет разрешить существенно меньшее количество вихревых структур. Особенно это сказывается в слоях, прилегающих к стенке насадки.

Наиболее популярным методом синтеза графена является метод химического осаждения из газовой фазы. К основным плюсам технологии относятся простота масштабирования, возможность прецизионного контроля параметров растущих структур, широкий спектр химических прекурсоров для синтеза графена, чистота получаемых материалов. Метод химического осаждения характеризуется высокой гибкостью, наличие большого количества параметров определяющих процесс, позволяет варьировать свойства синтезируемых структур в широком диапазоне. С другой стороны практически невозможно независимо варьировать отдельно выбранный параметр, что приводит к сложности в описании кинетики процессов при росте графена и сравнении результатов различных авторов. Таким образом, задача синтеза графеновых структур в современной научной литературе решается экспериментальным путем. Важными критериями при синтезе графена является количество формирующихся слоев, типы дефектов и их количество. Требования к параметрам растущих графеновых структур определяется приложениями, для которых их предполагается применять. Например, для оптических приложений, стремятся к максимальной прозрачности и отсутствию всех дефектов. Для приложений, основанных на сорбции-десорбции различных элементов, важно наличие дефектов в графитовых плоскостях.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований по синтезу графеновых структур с различным количеством слоев. Проведены исследования влияния параметров синтеза, на структуру формирующихся графеновых слоев. Синтез графена проводился методом термического осаждения из газовой фазы на медной фольге. В качестве газового прекурсора использовался метан.

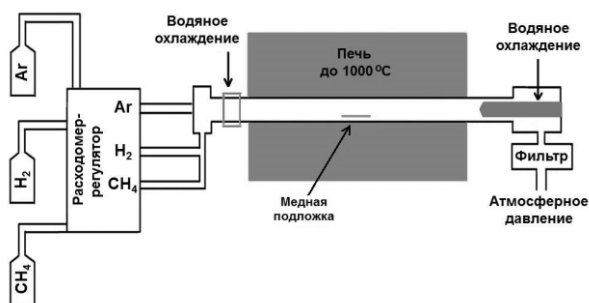


Рис. 1. Схематическое изображение установки для CVD синтеза.

Анализ синтезированных пленок проводился методами спектроскопии комбинационного рассеяния света, сканирующей электронной микроскопии, оптической микроскопии, атомно-силовой микроскопии.

Показано, что при увеличении концентрации метана в смеси растет степень покрытия меди графеновыми структурами и дефектность графена, при этом количество слоев графена не меняется. При повышении температуры синтеза происходит уменьшение количества слоев графеновых покрытий и уменьшение дефектности, увеличивается степень покрытия меди графеновыми слоями. Влияние водорода имеет нелинейный характер. Формирование графеновых структур происходит при парциальном давлении водорода в диапазоне 10-30%. При низких концентрациях водорода скорость роста графена лимитируется разложением метана на поверхности меди, при высоких концентрациях водорода происходит травление графеновых структур. При отжиге графеновых структур в кислородной атмосфере, возможно, контролируемо варьировать размеры дефектов в графеновых плоскостях.

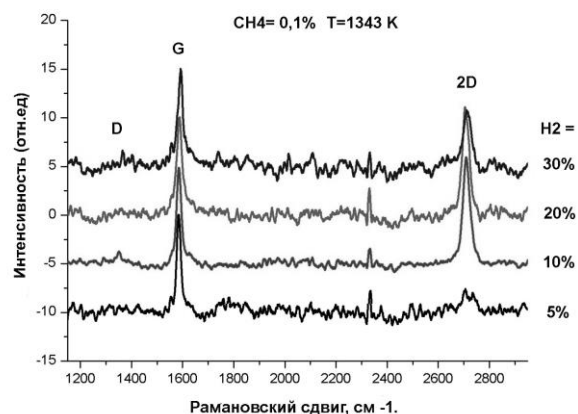


Рис. 2. КР спектры образцов, синтезированных при различной концентрации H_2 .

В результате экспериментов получены однослойные и многослойные графеновые структуры с различным количеством дефектов. Проведен анализ процессов при формировании графитоподобных структур при химическом каталитическом разложении углеводородов на поверхности меди.

Сухановский А.Н.¹, Евграфова А.В.¹, Теймуразов А.С.¹, Попова Е.Н.¹¹ Институт механики сплошных сред УрО РАН, ПермьE-mail: san@icmm.ru

Как известно гидродинамическая спиральность $H = \int \vec{v} \cdot \text{rot} \vec{v} dV$, при условии сходимости и при отсутствии твердых границ, является невязким инвариантом уравнения Эйлера [1], наряду с энергией и моментом импульса. Особенностью спиральности является то, что она характеризует топологию течения. В случае однородной и изотропной турбулентности наличие спиральности может повлиять на перенос энергии от больших масштабов к меньшим и привести к концентрации энергии на больших масштабах [2], при этом подчеркивается, что в рассматриваемом случае нет обратного каскада энергии. Основной проблемой является непосредственное измерение спиральности в лабораторных системах, лишь в последние годы появились первые, достаточно робкие попытки прямых измерений спиральности в природных системах и лабораторных экспериментах [3]. Очень интересной и перспективной экспериментальной конфигурацией для изучения спиральности является предложенная в [4] лабораторная модель тропического циклона. Детально, структура течения в постановке [4] была исследована в [5,6].

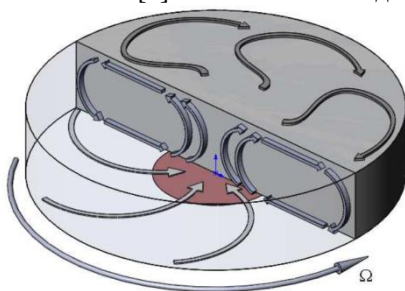


Рис. 1. Схема конвективных течений.

Формирование течений в предложенной системе происходит следующим образом. Нагрев в центре дна приводит к образованию горизонтального и вертикального градиентов температуры. Горизонтальный градиент формирует тороидальную конвективную ячейку. Течение в нижней части слоя направлено к центру, где расположен источник тепла. Интенсивное подъемное течение формируется в центре ячейки, над областью нагрева. В верхней части слоя течение движется от центра к периферии. Вблизи свободной поверхности жидкость охлаждается и опускается вблизи стенок ячейки. Сила Кориолиса действуя на радиальные течения приводит к образованию азимутальных движений. В центре формируется интенсивный циклонический вихрь, а на периферии относительно слабое антициклоническое течение (Рис.1.). Структура течений подобна типичной структуре тропического циклона построенной на основе натурных наблюдений и численных расчетов, включая наличие мелкомасштабных валов в погра-

ничном слое. Так как непосредственное измерение спиральности в рассматриваемой системе представляет собой технически очень сложную задачу, основной упор был сделан на проведение численного моделирования в CFD пакете OpenFOAM. Верификация результатов проводилась при помощи сравнения средних и мгновенных полей скорости в различных сечениях. Результаты расчетов показали, что спиральность конвективных течений от локализованного источника тепла во вращающемся слое отлична от нуля. Так как спиральность это скалярное произведение скорости на завихренность, то ее обычно разделяют на различные вклады, которые существенно зависят от структуры течения. В данной системе наличие спиральности обусловлена двумя основными механизмами (Рис.2.).

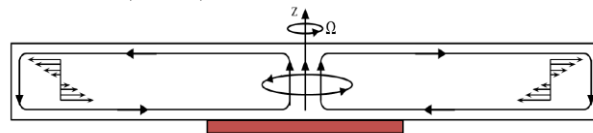


Рис. 2. Схема конвективных течений.

В центральной области спиральность является следствием сильной корреляции вертикальной скорости и завихренности, где на фоне подъемного течения формируется циклонический вихрь. На периферии наблюдается заметный сдвиг радиальной и азимутальной компонент скорости, что также приводит к отличным от нуля значениям спиральности (Рис.3.).

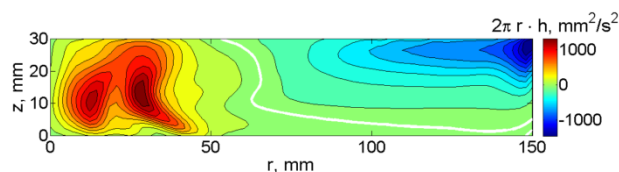


Рис. 3. Схема конвективных течений.

Работа поддержана проектом РФФ-DST 16-41-02012.

1. H. K. Moffatt. The degree of knottedness of tangled vortex lines," *J. Fluid Mech.* **35**, 117 (1969).
2. Stepanov, R., Golbraikh, E., Frick, P. & Shestakov, A. 2015. Hindered Energy Cascade in Highly Helical Isotropic Turbulence. *Physical Review Letters* **115** (23), 234501.
3. A. Eidelman, T. Elperin, I. Gluzman, and E. Golbraikh. Helicity of mean and turbulent flow with coherent structures in Rayleigh-Bénard convective cell. *Phys. Fluids* **26**, 065103 (2014).
4. Богатырев Г.П. Возбуждение циклонического вихря или лабораторная модель тропического циклона // *Письма в ЖЭТФ*. 1990. Т.51. Вып.11. С.557-559.
5. Batalov V., Sukhanovsky A. and Frick P. Laboratory study of differential rotation in a convective rotating layer. *J. Geophys. Astrophys. Fluid Dynam.*, **104**: 4, pp. 349 — 368, 2010.
6. A. Sukhanovskii and A. Evgrafova and E. Popova. Laboratory study of a steady-state convective cyclonic vortex // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2016, Vol. 142., Issue 698, 2214-2223, doi: 10.1002/qj.2823.

ЗАВИСИМОСТЬ ВЕЛИЧИНЫ ТЕПЛОВОГО ЭФФЕКТА ПИРОЛИЗА ОТ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА БИОМАССЫ

Табакаев Р.Б.¹, Астафьев А.В.¹, Николаева В.И.¹

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск

Е-mail: TabakaevRB@tpu.ru

Ежегодно интерес к возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) в мире неуклонно возрастает [1]. Эта тенденция отчасти обусловлена борьбой с изменениями климата. Минимизация загрязнения атмосферы стала движущей силой развития возобновляемых мощностей в таких странах, как Китай, на который приходится почти 40% их прироста. По данным Международного энергетического агентства (МЭА), в 2015 году в мировом масштабе ВИЭ впервые превзошли уголь по совокупной установленной мощности [2].

Применительно к северным странам (Канаде, России, Финляндии и др.) главной сдерживающей силой развития ВИЭ являются климатический и географический факторы, включающие низкие температуры воздуха, краткосрочность светового дня, наличие ветряных преград, таких как горы и леса. На данный момент практически единственным возможным для использования ВИЭ в этих странах видится биомасса (древесина и отходы её переработки, отходы сельскохозяйственной промышленности, торф и др.).

Однако биомасса в естественном виде из-за высокой влажности, низкой теплоты сгорания, мелкого фракционного состава мало пригодна для сжигания [3]. Требуется поиск технологий повышения её теплотехнических характеристик и транспортабельности.

Перспективным направлением энергетического облагораживания биомассы является её термическая переработка в высококалорийные твердое, жидкое или газообразное топлива. Для реализации термической переработки необходим подвод тепла, которое может быть частично или полностью компенсировано за счет теплового эффекта, наблюдаемого в процессе термической деструкции.

Целью работы является установление зависимости величины теплового эффекта низкотемпературного пиролиза от элементного состава биомассы.

В качестве биомассы исследованы солома, щепа из смеси древесных пород, сосновые опилки, торф (табл. 1). Тепловой эффект определен методом дифференциально-термического анализа (ДТА) при нагреве до 650°C (скорость нагрева 10°C в минуту) и пересчитан на сухое состояние биомассы.

Табл. 1. Характеристики биомассы

Биомасса	Тепловой эффект пиролиза, кДж/кг	Элементный состав, %				
		C^{daf}	H^{daf}	N^{daf}	S^{daf}	O^{daf}
солома	1474,8	50,20	6,36	1,09	—	42,35
щепа	1103,0	50,32	6,05	0,24	—	43,39
опилки	1062,3	52,50	6,58	0,22	—	40,70
торф	862,2	52,06	6,31	3,58	0,20	37,85

Многие исследователи отмечают зависимость теплового эффекта от содержания кислорода в топливе. Согласно [4] с ростом кислорода до значения 40% тепловой эффект пиролиза увеличивается, но у топлив с ещё большим содержанием кислорода наблюдается снижение тепловыделения при разложении. Этот вывод подтверждают данные, полученные нами (рис. 1).

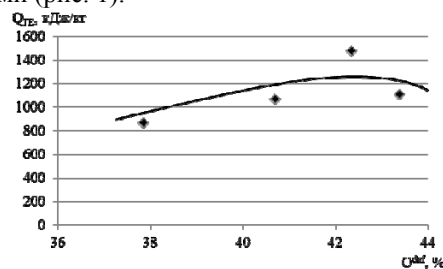


Рис. 1. Зависимость величины теплового эффекта пиролиза биомассы (Q_{TE}) от содержания кислорода (Q^{daf})

Однако, высокий выход пирогенетической влаги (12,2-30,0%), полученный при проведении полукоксования (низкотемпературного пиролиза) высушенной биомассы согласно ГОСТ 3168–93, приводит к выводу о необходимости изучения зависимости величины тепловых эффектов от двух элементов – водорода и кислорода (рис. 2). Вероятно, образование пирогенетической влаги связано с взаимодействием гидроксильных групп и атомарного водорода, образующихся при термической деструкции: $OH + H = H_2O$. В результате данной реакции выделяется тепло, обеспечивающее тепловой эффект пиролиза.

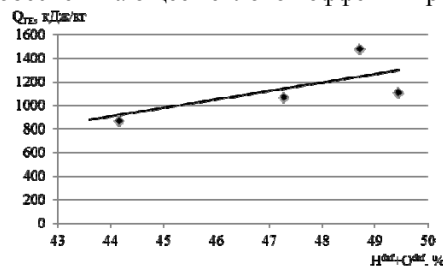


Рис. 2. Зависимость величины теплового эффекта пиролиза биомассы (Q_{TE}) от совокупного влияния водорода (H^{daf}) и кислорода (Q^{daf})

1. Фортов В.Е., Попель О.С. Состояние развития возобновляемых источников энергии в мире и в России // Теплоэнергетика. 2014. № 6. С. 4–13.
2. Кларк П. Возобновляемая энергетика обогнала уголь // Ведомости. 2016. № 4190 (электронный ресурс: <http://www.vedomosti.ru/business/articles/2016/10/25/662346-vozobnovlyaemaya-energetika-obognala-ugol>).
3. Тугов А.Н., Рябов Г.А., Штегман А.В. и др. Опыт ВТИ по использованию в энергетике проблемных топлив // Теплоэнергетика. 2016. № 7. С. 3–11.
4. Агроскин А.А., Глейбман В.Б. Теплофизика твёрдого топлива. М.: Недра, 1980. 256 с.

Работа поддержана РФФИ (грант № 16-38-50124).

СРАВНЕНИЯ МЕТОДИК ИЗМЕРЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАССЫ В ПРОЦЕССАХ ПЫЛЕНИЯ.

Тен К.А., Пруул Э.Р., Кашкаров А.О., Рубцов И.А., Шехтман Л.И., Жуланов В.В., Толочко Б.П.

¹Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

²Институт ядерной физики им. Будкера СО РАН, Новосибирск

³Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск

⁴Новосибирский государственный университет

E-mail: ten@hydro.nsc.ru

При выходе сильной ударной волны (УВ) на свободную поверхность (СП) металлов из СП происходит выброс микрочастиц. Это явление представляет большой интерес [1-3]. На СП развиваются микровозмущения, которые приводят к образованию мелкодисперсной фракции, распределенной в пространстве по размерам и скоростям. Развитие процесса роста неустойчивости на СП металла и, соответственно, характеристики пылевого облака зависят от фазового состояния материала, реологических свойств вещества, условий нагружения и т.д.

Сотрудниками ВНИИЭФ и ЛАНЛ [1-2] проведена серия экспериментов в области давлений, когда металл находится в смешанном твердо-жидком состоянии в волне разгрузки. Авторами работ экспериментально было показано, что масса выброшенных частиц не зависит от амплитуды давления УВ, а определяется только профилем УВ, выходящей на СП, и параметрами начальных возмущений. Этот результат справедлив для металлов, переходящих в жидкое состояние после УВ-воздействия.

Для получения распределения плотности потока частиц используют метод импульсной рентгенографии и метод пьезоэлектрического датчика. При характерной плотности пылевого потока $\sim 0,01 \text{ г/см}^3$, получение изображения такого объекта рентгенографическим методом и его последующая обработка являются сложной задачей. В работе [3] для регистрации методом импульсной рентгенографии облака частиц предложена конструкция протяженной экспериментальной сборки, позволившая в традиционной для импульсной радиографии постановке опыта не только отчетливо увидеть размеры, форму и состояние вещества в различных областях заряда ВВ в процессе развития взрыва, но и определять распределение плотности за фронтом.

В Сибирском отделении РАН для исследования процессов пыления используют синхротронное излучение (СИ) от мощных ускорителей [4]. Особенностью накопителя ВЭПП-3 является: 1- очень «мягкий» спектр излучения СИ (энергия рентгеновских квантов менее 30 кэВ), 2 – возможность регистрации многих кадров (кино) с периодом 0.5 -1.0 мкс. При использовании детектора DIMEX-3 такой спектр позволяет регистрировать потоки микрочастиц с плотностью $\sim 0,001 \text{ г/см}^3$. В докладе представлены результаты экспериментов, в которых одновременно реализованы две методики: с использованием пьезо-

электрических датчиков, и СИ. Одновременная регистрация потоков микрочастиц двумя методиками позволила: во-первых, сопоставить результаты измерений, и, во-вторых, провести независимую калибровку методик.

Исследовались потоки микрочастиц из канавок с размером от 5 мкм до 60 мкм выполненных на поверхности олова. Ударная волна создавалась прессованным октогеном.

Впервые получены одновременные записи рентгеновской съемки и пьезодатчиком. Методом СИ получены динамика распределений плотности пылевого потока до плотностей $\sim 5 \text{ мг/см}^3$.

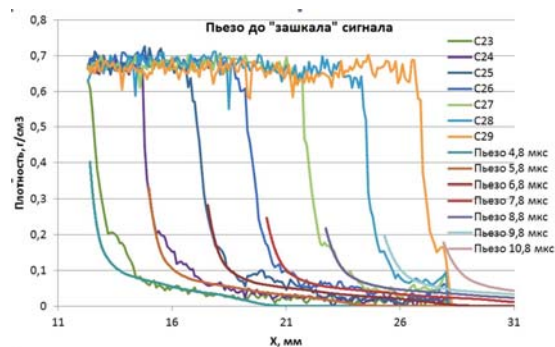


Рис. 1. Распределение плотности потока частиц, измеренные пьезодатчиком и детектором СИ.

Сопоставление методик (рис.1) показывает хорошее совпадение полученных данных в диапазонах плотностей до 0.2 г/см^3 .

1. А.Л. Михайлов, В. Л. Огородников, В. С. Сасик, и др. Экспериментально-расчетное моделирование процесса выброса частиц с ударно-нагруженной поверхности. // ЖЭТФ, 2014, том 145, вып. 5, стр. 892-905.
2. M.B. Zellner, M. Byers, G. Dimonte J.E. Hammerberg, T.E. Germann, P.A. Rigg, W.T. Buttler. Influence of shockwave profile on ejection of micron-scale material from shocked Sn surfaces: An experimental study. EPJ Web of Conferences v.6, N 39012, (2010)
3. Антипов М.В., Георгиевская А. Б., Игонин В.В. и др. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны. Под редакцией А.Л. Михайлова. РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров. 2015. 910 стр.
4. Ten K.A., Prueel E.R., Kashkarov A.O., Rubtsov I.A., et al. Detection of microparticles in dynamic processes. Journal of Physics: Conference Series, Volume 774, Number 1, Page 012070.

Работа поддержана РФФИ (грант № 16-29-01050).

**ДИНАМИКА ИМПУЛЬСОВ СИЛЫ И ПУЛЬСАЦИЙ ПУЗЫРЯ
ПРИ СЖИГАНИИ ГАЗОВ НА ТЯГОВОЙ СТЕНКЕ В ВОДЕ**
Тесленко В.С., Дрожжин А.П., Медведев Р.Н.

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева, Новосибирск

E-mail: teslenko@hydro.nsc.ru

Проведены сравнительные эксперименты по измерению тяги при импульсном сжигании стехиометрической пропан-кислородной смеси на тяговой стенке в цилиндрической камере и на открытой стенке в виде плоского диска.

На Рис. 1 представлен пример регистрации импульсов силы на тяговую стенку при сжигании 3 см^3 газовой смеси в стволе длиной $H = 91 \text{ мм}$. А на Рис. 2 представлена осциллограмма импульсов силы на плоскую стенку в виде диска при сжигании 3 см^3 газовой смеси. Интегрирование импульсов силы ($I_n = \int F(t)dt$) и расчеты удельной тяги ($J_m = I_n/m$, m – масса горючей смеси) показали соизмеримость получаемых результатов. Например, для цилиндрического ствола диаметром $d = 29 \text{ мм}$ длиной $H = 91 \text{ мм}$ удельная тяга $J_m = 1,5 \cdot 10^4 \text{ сек}$, а для случая взрыва 3 см^3 газовой смеси на диске диаметром $D = 98 \text{ мм}$ удельная тяга $J_m = 2,5 \cdot 10^4 \text{ сек}$.

Результаты экспериментов показали, что удельная тяга для случая сжигания газа на плоской стенке не уступает, а в некоторых случаях превосходит удельную тягу для цилиндрической трубы. Это можно объяснить отсутствием потерь на трение в стволе и краевые эффекты на кромке ствола [1, 2]. Скоростная киносъемка гидродинамических процессов показала, что при пульсации пузыря от продуктов сгорания на плоской стенке радиальная составляющая импульса при схлопывании трансформируется в симметричный осевой поток, одна часть которого обеспечивает вклад в тягу, а противоположная обеспечивает выброс продуктов сгорания и ускоренное заполнение рабочего пространства новой порцией жидкости, аналогично кольцевой геометрии [3].

Полученные результаты указывают на возможность сжигания газов в воде на плоской стенке с частотой большей, чем частота сжигания в цилиндрической камере при прочих равных условиях. Максимально возможная частота сжигания в случае плоской стенки $\nu_{\max}$ определяется как $\nu_{\max} = 1/T$, где T – период пульсации полусферического пузыря, который приближенно рассчитывается по формуле Релея.

Увеличение частоты сжигания с одновременным сохранением величины удельной тяги при переходе от цилиндрической трубы к плоской стенке позволяет увеличить среднюю тягу (отношение импульсов силы к длительности одного цикла сжигания) подводного двигателя и уменьшить кавитационные и фрикционные потери.

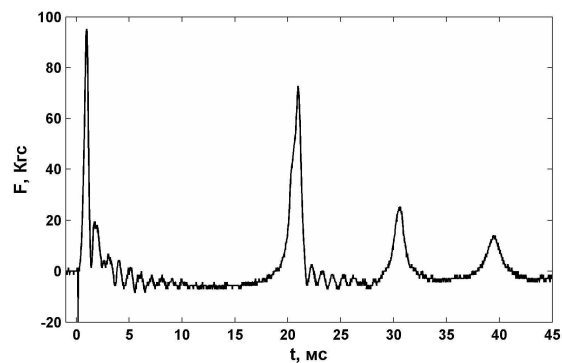


Рис. 1 Импульсы силы при сжигании 3 см^3 газовой смеси в стволе длиной $H=91 \text{ мм}$.

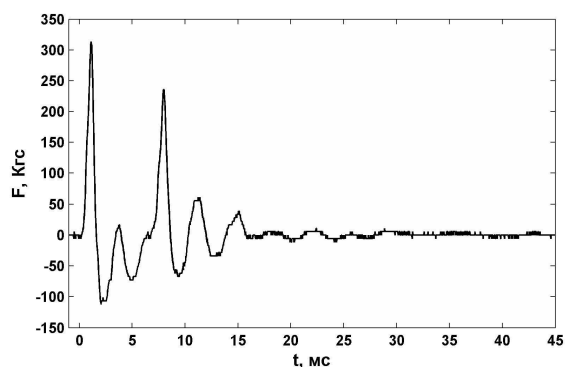


Рис. 2 Импульсы силы при сжигании 3 см^3 газовой смеси на диске.

Литература:

- Медведев Р.Н., Дрожжин А.П., Тесленко В.С. Порог образования кавитационных вихревых колец при истечении жидкости из затопленной трубы // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. 2015, № 1 (16). С. 86-89.
- R.N. Medvedev, A.P. Drozhzhin, V.S. Teslenko. Thrust generation by pulse combustion of gas in a submerged chamber // International Journal of Multiphase Flow, 2016, Vol. 83, pp. 232-238. <http://swsl.hydro.nsc.ru/publ/Medvedev-IJMF2016.pdf>
- В.С. Тесленко, А.П. Дрожжин, Р.Н. Медведев, И.С. Батраев. Сжигание газов в воде в линейных и кольцевых пузырях // Теплофизика и аэромеханика, 2014. Т. 21. № 4. С. 497-507 <http://swsl.hydro.nsc.ru/publ/TiA2014.pdf>

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОЙ СТРУКТУРЫ НЕДОРАСШИРЕННЫХ СВЕРХЗВУКОВЫХ МИКРОСТРУЙ

Тимофеев И.В.¹, Анискин В.М.²

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

² Институт теоретической и прикладной механики СО РАН им. С.А. Христиановича,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

В связи со значительными прикладными возможностями микроскопических газовых и жидкостных устройств возникает интерес к изучению течения газа на микромасштабах. Касается это как течения газа в микроканалах, так и истечения газа из отверстий микронных размеров. В зависимости от давления на выходе отверстия, струя может быть, как дозвуковой, так и сверхзвуковой. Дозвуковые и сверхзвуковые микроструи могут применяться в управлении макротечениями, для уменьшения шума, в струйных системах охлаждения. Сверхзвуковые струи малых размеров нашли также применение в реактивных системах ориентации спутников с массой менее 10 кг, так называемых наноспутниках [1-3].

Объектом исследования являются сверхзвуковые микроструи, истекающие из плоских сопел микронного размера.

В работе рассматривались сверхзвуковые микроструи, истекающие в окружающее пространство из плоских сопел высотой от 175 до 22 мкм.

В качестве рабочего газа использовался сжатый воздух. Давление газа в форкамере сопла изменялось в диапазоне от 2 до 10 атм. Была выполнена визуализация течения микроструй (рис. 1), проведены измерения с помощью микротрубки Пито и термоанометра.

Микротрубка Пито и датчик термоанометра закреплялись на державке, перемещаемой в пространстве с помощью микроманипулятора. Положение датчика контролировалось под микроскопом.

По полученным данным определены размеры бочек сверхзвуковых микроструй и определена их дальноточность. Показано увеличение дальноточности для струй, истекающих из сопел высотой менее 50 мкм в диапазоне нерасчетности струи от 1,1 до 1,2.

Список литературы

1. Agasid E., Burton R., Goktug Karacalioglu A., Carlino R. et al. Small Spacecraft Technology State of the Art. NASA Technical Memorandum, 2015. NASA/TP-2015-216648/REV1
2. Juergen M. Thruster Options for Microspacecraft: A Review and Evaluation of Existing Hardware and Emerging Technologies // AIAA 97-3058. 19 p.
3. Scharlemann C., Tajmar M., Propulsion for Nanosatellites // Conference: The 32nd International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany, September 11-15, 2015. 11 p.

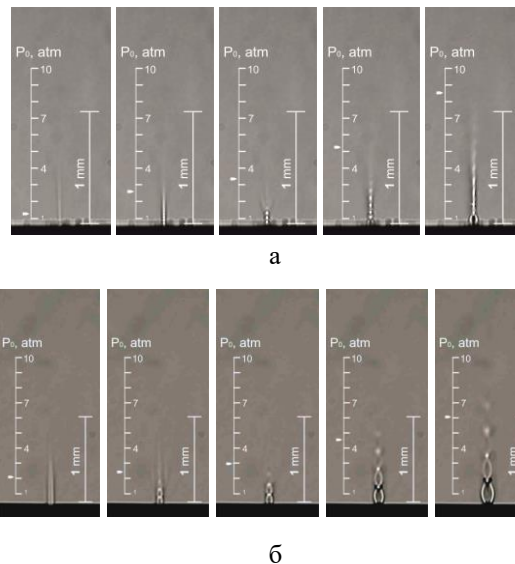


Рис. 1. Визуализация струи, истекающей из сопла высотой 22,3 мкм (а) и 83,3 мкм (б).

ГЕНЕРАЦИЯ ПРИСТЕННОЙ СТРУИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ КАВИТАЦИЕЙ НА ГИДРОКРЫЛЕ

Тимошевский М.В.¹, Запрягаев И.И.¹, Первунин К.С.^{1,2}, Маркович Д.М.^{1,2,3}¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск² Новосибирский национальный исследовательский государственный университет (НГУ), Новосибирск³ Томский политехнический университет (ТПУ), Томск

E-mail: timoshevskiy.mv@gmail.com

В процессе эксплуатации гидротехнического оборудования приходится неизбежно сталкиваться с явлением кавитации. До тех пор, пока кавитационная каверна остается стационарной, ее влияние на проточные элементы проточного тракта и динамику течения, не принимая во внимание кавитационную эрозию, считается слабым, а режим работы гидроагрегатов – безопасным. Однако при переходе к нестационарным режимам кавитационного обтекания осцилляции кавитационной каверны вызывают пульсации расхода и давления во всем проточном тракте. Это, в свою очередь, уменьшает КПД гидравлического оборудования, приводит к росту вибрационных нагрузок на рабочие элементы, снижая их рабочий ресурс, а в некоторых случаях может вывести оборудование из строя, либо даже стать причиной аварии. Для повышения надежности гидротехнического и гидроэнергетического оборудования и расширения диапазона рабочих режимов их эксплуатации применяются различные методы управления кавитирующими течениями. Одним из таких методов, наиболее простых в реализации, наименее энергетически затратных и технически надежных, является непрерывная инжекция жидкости вдоль поверхности тел обтекания [1].

В работе был реализован данный метод управления на двумерном симметричном гидрокрыле, являющемся уменьшенной моделью направляющей лопатки (НЛ) радиально-осевой гидротурбины. Для этого на поверхности НЛ на расстоянии $0,6C$, где $C = 100$ мм – длина хорды НЛ, был создан поперечный щелевой канал высотой $0,8$ мм для генерации пристенной струи. Таким образом, исследование направлено на изучение возможности управления кавитационным обтеканием модели НЛ и на определение эффективности указанного метода управления. Для анализа пространственной структуры и динамики кавитационных каверн была использована высокоскоростная визуализация с частотой дискретизации до 20 кГц. Эволюция и структура течения вблизи поверхности модельного гидрокрыла, в том числе пристенной струи, исследовалась с помощью методов цифровой трассерной визуализации (Particle Image Velocimetry – PIV) с высоким пространственным разрешением и высокоскоростной (10 кГц) лазерноиндуцированной флуоресцентной визуализации (Laser-Induced Fluorescence – LIF). Помимо этого, были проведены гидроакустические измерения пульсаций давления в следе за моделью НЛ с целью определения выделенных частот колебаний нестационарных парогазовых каверн. Эксперименты были проведены для двух углов атаки 3° и 9° при различных режимах кавитационного обтекания по числу кавитации и скорости инжекции U_{inj} .

В результате было показано, что на стационарных режимах течения генерация пристенной струи с относительной скоростью $U_{inj}/U_0 < 1$, где U_0 – среднерасходная скорость, позволяет существенно сократить или даже полностью подавить парообразование выше по течению относительно положения щели.

Для нестационарных режимов кавитационного обтекания было зарегистрировано уменьшение амплитуды пульсаций давления, связанных с периодическими колебаниями каверны. При этом происходит рост турбулентных флуктуаций скорости в два раза вблизи поверхности НЛ ниже по течению относительно положения щели. Увеличение скорости пристенной струи ($U_{inj}/U_0 > 1$) приводит к обратному эффекту: происходит интенсификация процесса парообразования на стационарных режимах обтекания и увеличение амплитуды пульсаций давления на нестационарных режимах. Турбулентные флуктуации скорости падают в два раза (рис. 1), толщина пограничного слоя уменьшается в полтора раза. Метод лазерноиндуцированной флуоресценции позволил детально визуализировать процесс истечения пристенной струи. Было обнаружено, что истечение струи однородно вдоль всего щелевого канала для большинства реализующихся режимов. Исключением являются режимы стационарного кавитационного обтекания при угле атаки 9° и $U_{inj}/U_0 < 0,4$, на которых отрывная зона распространяется до щелевого зазора.

Таким образом, низкоскоростная инжекция оказывается эффективной для ослабления кавитации, но инжектирование жидкости с высокой скоростью более предпочтительно с точки зрения гидродинамики течения. Реализованный метод управления кавитационным обтеканием модельного гидрокрыла в целом позволяет в некоторой степени сократить размер области кавитации (до 20%) и расширить диапазон стационарных режимов обтекания. На нестационарных режимах течения инжекция жидкости позволяет снизить амплитуду пульсаций давления в следе за крылом в $2 - 3$ раза, а иногда стабилизировать течение.

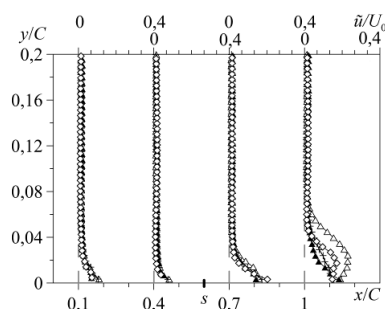


Рис. 1. Эволюция продольной компоненты флуктуационной составляющей скорости вниз по потоку со стороны разрежения модели НЛ при $\alpha = 3^\circ$, $\sigma = 1,26$ для (+) $U_{inj}/U_0 = 0$, (Δ) $U_{inj}/U_0 = 0,64$ и ($\blacktriangle$) $U_{inj}/U_0 = 1,32$, в сравнении с распределениями для немодифицированной НЛ ($\diamond$).

Список литературы

1. Kozhukharov P.G., Hadjimikhalev V.H., Mikuta V.I., Maltzev L.I. Hydrofoil performance control introducing tangential liquid jet // ASME Fluids Engineering Division. 1985. V. 31. P. 67–74.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-19-00138 под руководством Куйбина П.А. в ИТ СО РАН).

ПЕРЕНОС ЧАСТИЦ ПРИ МНОГОФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Толмачева К.И.^{1,2}, Боронин С.А.¹, Осипцов А.А.¹¹ Сколковский институт науки и технологий, Центр добычи углеводородов, Москва² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

E-mail: kristina.tolmacheva@skolkovotech.ru

Задача о многофазной фильтрации суспензии с сопутствующим переносом твердых частиц актуальна при описании процессов загрязнения и очистки прискважинной зоны нагнетательных скважин. Твердые частицы со стенок скважины и из пор прискважинной зоны могут двигаться вместе с нагнетаемой жидкостью, застревать в порах и вымываться из них, что может сильно повреждать проницаемость пористой среды. Для оптимизации предлагается использовать комбинированный подход, основанный на моделировании фильтрации с учетом загрязнения и очистки прискважинной зоны.

1. Постановка задачи. В данной работе предложено развитие модели многофазной трехконтинуальной [1] модели фильтрации суспензии в пористой среде [2]. Учитываются эффекты осаждения и мобилизации (вымывания) частиц, что может приводить к значительному изменению проницаемости. Учет конечности проницаемости и пористости среды, образованной осажденными частицами, отличает данную модель от известных в литературе [3-4].

Одна из часто используемых моделей фильтрации суспензии – «deep-bed filtration model» [3], содержит три свободных параметра, описывающих скорость осаждения частиц, два параметра для описания мобилизации и четыре параметра в формуле для проницаемости. Предложенная модель предлагает сократить число свободных параметров, отвечающих за осаждение до одного, а также предлагает теоретическую формулу для одного из параметров, отвечающих за мобилизацию. Кроме того, используется соотношение между проницаемостью и объемной долей осажденных частиц, не содержащее свободных параметров [4].

2. Сравнение с экспериментальными данными. Для валидации предложенной модели было проведено сравнение с экспериментальными данными по загрязнению керна [5]. Имеются экспериментальные данные по распределению концентрации осажденных частиц вдоль образца после проведения эксперимента. Сравнивая результаты моделирования в рамках новой и классической моделей фильтрации (см. рис. 1), можно установить, что новая модель лучше, чем классическая описывает концентрацию осажденных частиц в областях, где последняя близка к максимально возможной.

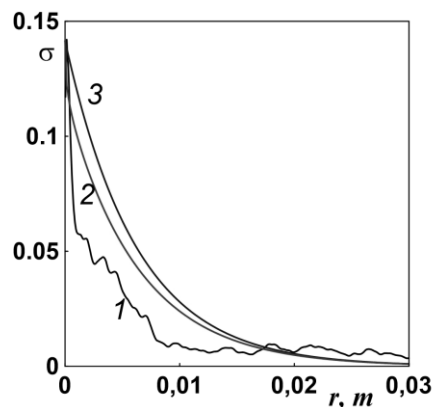


Рис. 1. Распределение объемной концентрации осажденных частиц вдоль пористого образца Bentheimer. Кривая 1 - экспериментальные данные; 2, 3 - результаты численного моделирования в рамках новой и классической моделей соответственно.

3. Примеры численных расчетов. Были проведены предварительные расчеты повреждения и восстановления проницаемости прискважинной зоны при нагнетании суспензии при длине скважины 1000 м (см. рис. 2).

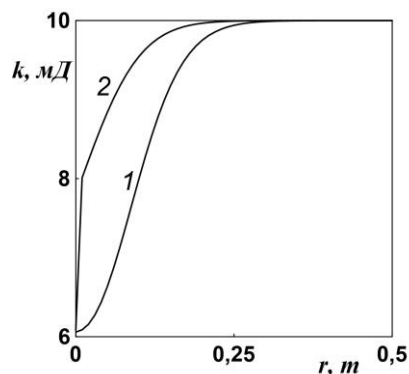


Рис. 2. Распределение поврежденной проницаемости в призабойной зоне (скважина слева). Кривая 1 – течение суспензии слева направо (загрязнение), 2 – течение чистой жидкости справа налево (очистка).

1. Nigmatulin, R.I. Dynamics of multiphase media // CRC Press. 1990. V. 2. P. 360.
2. Boronin, S.A., Osipov, A.A. and Tolmacheva, K.I. Multi-fluid model of suspension filtration in a porous medium // Fluid Dynamics. 2015. V. 50, No. 6. P. 759-768.
3. Gruesbeck, C. and Collins, R.E. Entrainment and deposition of fine particles in porous media // Society of Petroleum Engineers Journal. 1982. V. 22. No. 6. P. 847-856.
4. Boek, E.S., Hall, C. and Tardy, P.M. Deep bed filtration modelling of formation damage due to particulate invasion from drilling fluids // Transport in porous media. 2012. V. 91. No. 2. P. 479-508.
5. Mikhailov D. et al. An Integrated Experimental Approach to Determining How Invaded Mud Components Modify Near-Wellbore Properties (Russian) //SPE Russian Oil and Gas Exploration & Production Technical Conference and Exhibition. – Society of Petroleum Engineers. 2014.

**ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ ТЕПЛОВОЙ
СХЕМЫ ТУРБИН АЭС В ПЕРЕМЕННЫХ РЕЖИМАХ
Трифонов Н.Н., Сухоруков Ю.Г., Николаенкова Е.К., Святкин Ф.А.**

Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им.
И.И. Ползунова

E-mail: bdzu03@ckti.ru

Система регенерации и промежуточной сепарации и перегрева пара (ПСПП) паровых турбин АЭС мощностью 1000÷1200 МВт включает в себя четыре подогревателя низкого давления (ПНД) из которых второй подогреватель по ходу основного конденсата смешивающего типа (ПНД-2), деаэратор (Д), подогреватели высокого давления (ПВД-К), два или четыре сепаратора-пароперегревателя (СПП), сепарто-сборник (СС), конденсатосборник (КС) первой и второй ступени.

ПНД-2, СС и Д работают при скользящем давлении пара в аппаратах. Из ПНД-2, СС и Д вода на линии насыщения откачивается насосами и подается в водяной тракт тепловой схемы.

Опыт эксплуатации энергоблоков АЭС мощностью 1000 МВт выявил несоответствия динамических характеристик Д совместно с регулируемыми клапанами подачи пара из КС и ПВД-К и компоновочных решений совместно с бустерным насосом и его кавитационной характеристикой. Это несоответствие в переходных режимах приводит к кавитационному срыву насосов и останову блока.

В системе ПСПП также выявлена неустойчивая работа системы «СС-трубопровод-насос слива сепарата (НСС)» приводящая к срабатыванию защиты и останову блока [1].

Выполненный в ОАО «НПО ЦКТИ» анализ показал, что устойчивая работа системы «теплообменный аппарат-трубопровод-насос» обеспечивается при соблюдении условия уравнения (1):

$$\frac{dP_a}{d\tau} \leq \frac{dP_{\text{мруб}}}{d\tau} \quad (1)$$

где $\frac{dP_a}{d\tau}$ – скорость падения давления пара в аппарате;

$\frac{dP_{\text{мруб}}}{d\tau}$ – допускаемая скорость падения давления

по условию отсутствия вскипания воды в трубопроводе и кавитационного срыва насосов.

Скорость падения давления пара в аппарате зависит от режима работы энергоблока и возникающем при этом соотношения расходов и энтальпии входя-

щих и уходящих потоков и запасенного тепла в аппарате.

Для любой тепловой схемы справедливы уравнения материального и энергетического балансов, при совместном решении которых получается выражение для скорости падения давления пара.

Каждая система, включающая всасывающий трубопровод и насос, допускает при данной компоновке только определенную скорость падения давления, при которой обеспечивается безкавитационная работа насоса и предотвращается вскипание воды в нем.

В уравнении учитывается влияние величины недогрева воды при её движении по всасывающему трубопроводу с учетом её перегрева (если он есть), сопротивления трения, кинетической энергии, скорости падения давления в аппарате и отдачи тепла металлом трубопровода и кавитационной характеристикой насоса [2].

Расчет динамических характеристик системы ДПУ показал, что при падении давления в аппарате скорость изменения давления превышает значение допускаемой. Это приводит к кавитационному срыву насоса.

Для исключения кавитационного срыва насоса предлагается выполнить следующие мероприятия:

- изменить настройку регуляторов подачи пара, конденсата греющего пара СПП, ПВД-К в деаэратор, уменьшающих скорость падения давления;
- расходные характеристики клапанов подачи пара, кгп СПП и ПВД-К выполнить близко к линейным;
- изменить трассировку трубопровода отвода воды из деаэратора к бустерному насосу;
- выполнить захолаживание воды на всасе бустерного насоса.

Допускается внедрение одного или нескольких мероприятий.

1. Н.Н. Трифонов, Ю.Г. Сухоруков, В.Ф. Ермолов и др. Опыт разработки и результаты испытаний оборудования системы регенерации и ПСПП энергоблока № 4 Калининской АЭС//Теплоэнергетика.2014. № 6. с.44-48.
2. Д.Ф. Петерсон Надежность циркуляции при колебаниях давления в котле. Котлотурбостроение. № 3. 1951.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУР ТЕЧЕНИЯ С НАКЛОННОЙ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНОЙ В ГИПЕРЗВУКОВОЙ КОЛЬЦЕВОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ

Троцюк А.В.

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

E-mail: trotsyuk@hydro.nsc.ru

В настоящей работе начаты исследования по изучению структур и режимов течения с наклонной детонационной волной (ДВ) внутри кольцевой цилиндрической детонационной камеры (ДК), на входе которой имеется гиперзвуковой поток с числом Маха M_0 ($M_0 > M_{CJ}$) однородно перемешанной стехиометрической водородо-воздушной смеси. Наклонная ДВ формируется внутри канала над телом сжатия, представляющего собой твердую бесконечно тонкую однозаходную спираль между внешним и внутренними цилиндрическими стенками камеры. Спираль имеет угол наклона α по отношению к оси камеры. Рассматриваемое течение моделируется в двумерной постановке, как это традиционно делается и при исследовании вращающихся ДВ в кольцевых камерах.

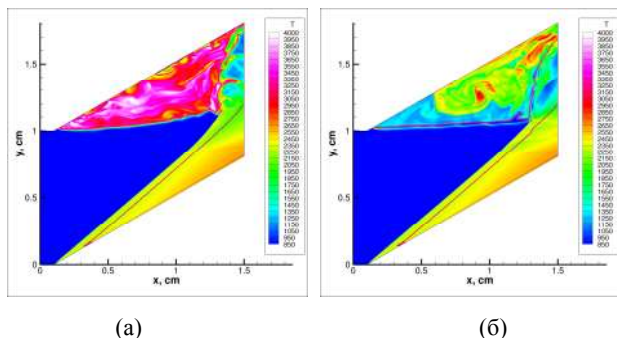


Рис. 1. Стационарное течение в ДК, поле температуры (К). Начальное состояние газа: (а) – равномерный поток; (б) – состояние покоя. Красная сплошная линия – граница зоны индукции.

В работе [1] с использованием двухстадийной детонационной кинетики нами было проведено численное моделирование двумерной ячеистой структуры ДВ в водородо-кислородных смесях различного состава. Стадия энерговыведения описывалась согласно модели химической кинетики [2,3]. Получено прекрасное совпадение размеров детонационных ячеек с известными экспериментальными данными.

Разработанный численный код с указанной двухстадийной кинетикой применялся при моделировании данного течения в кольцевой ДК. Расчеты проведены для различных значений длины ДК L , высоты области $H=2\pi r_c$, угла спирали α , числа Маха M_0 .

При $M_0=5$ и $\alpha=30^\circ$ был обнаружен эффект бифуркации решения, см Рис.1. При относительно небольших значениях $H=1$ см мы имеем сильное взаимодействие наклонной ДВ, формируемой над поверхностью сжатия спирали, с двумерной волной разрежения (ВР), формируемой за поверхностью разрежения этой же спирали. Эта зона горения в ВР обладает сложной структурой с турбулентными нестационарными сдвиговыми слоями и зонами возвратного течения. Однако в среднем по времени эта область решения достаточно стабильна. Найдено, что форма и

структура течения в ВР зависит от предыстории развития реагирующего течения в рассматриваемой ДК. При старте ($t=0$) с однородного потока смеси $\mathbf{u}=(M_0 c_0, 0)$ получается решение, показанное на Рис.1а. Здесь $\mathbf{u}$ – двумерный вектор массовой скорости смеси. При старте с неподвижной смеси, $\mathbf{u}=(0,0)$, формируется течение, представленное на Рис.1б. Видно, что эти два решения достаточно сильно отличаются друг от друга по размерам, форме и структуре потока, по величинам параметров в ВР и т.д.

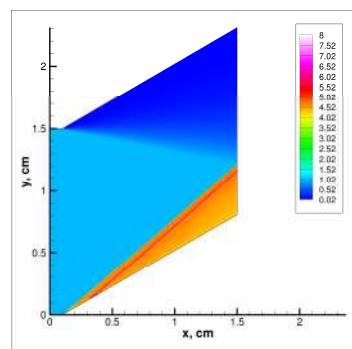


Рис. 2. Стационарное течение в ДК, поле нормализованной плотности ρ/ρ_0 .

Исследование стабильности по времени полученных двух решений и их зависимость от используемой разностной сетки показало, что данные структуры стационарны (в среднем) и не переходят одна в другую или не вырождаются в какую-либо третью общую конфигурацию течения.

Исследование показало, что структура течения в ДК скачкообразно перестраивается при изменении параметра H . На Рис.2 показано поле течения при $H=1,5$ см, остальные параметры прежние. Не наблюдается взаимодействия ВР с гладкой наклонной ДВ, что приводит к отсутствию горения в ВР. Дополнительные вычисления показали, что для этой конфигурации отсутствует эффект бифуркации по начальному вектору решения.

1. Trotsyuk A.V. (1999). Numerical simulation of the structure of two-dimensional gaseous detonation of an H_2-O_2-Ar mixture // Combustion, Explosion and Shock Waves. 1999. V. 35. P. 549–558.
2. Nikolaev Yu.A., Fomin P.A. Analysis of equilibrium flows of chemically reacting gases // Combustion, Explosion and Shock Waves. 1982. V. 18. P. 53–58.
3. Nikolaev Yu.A., Zak D.V. Agreement of models of chemical reactions in gases with the second law of thermodynamics // Combustion, Explosion and Shock Waves. 1988. V. 24. P. 461–464.

Исследование проведено при поддержке РФФИ (грант № 17-03-01351). Расчеты выполнены на суперкомпьютере МВС-100К Межведомственного Суперкомпьютерного Центра (МСЦ РАН), Москва.

ЧИСЛЕННО МОДЕЛИРОВАНИЕ СНАРЯДНОГО РЕЖИМА ТЕЧЕНИЯ ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ГАЗА В ЖИДКИЙ МЕТАЛЛ

Усов Э.В.¹, Чухно В.И.², Кутлиметов А.Э.², Прибатурин Н.А.¹,

¹ Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Новосибирский филиал, г. Новосибирск

² Новосибирский государственный университет

E-mail: usovev@gmail.com

При возможной аварии в реакторах с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями связанных с разрывом теплообменных трубок водяной пар, находящийся в межконтурном пространстве, поступает в контур теплоносителя. В результате контакта жидкого металла с водяным паром происходит интенсивный теплообмен. В случае течей вода-натрий происходит интенсивная химическая реакция с выделением гидроксида натрия и водорода, происходит кипение теплоносителя. В результате образуется парогазовая смесь.

Настоящая работа посвящена разработке подходов для моделирования движения газовых пузырей в каналах с жидкими металлами с учетом явления теплообмена между фазами. Для моделирования переноса газовой смеси в потоке теплоносителя используется двухжидкостное приближение и ряд приближений, таких как закон Дальтона, равенство давлений жидкой и газовой фазы, термодинамическое равновесие пара и газовых компонент.

В работе проведен анализ и выбраны соотношения для расчета межфазного трения для снарядов, движущихся в жидком металле, так как снарядный режим течения наиболее характерен для аварии с разрывом трубок парогенератора. Скорость всплытия снаряда определяется балансом подъемной силы с силой поверхностного натяжения, силой вязкости и инерционными силами. Для расчета коэффициента трения в этом случае используется корреляция Уоллиса. [1]:

$$k = 0,345 \left(1 - e^{\frac{-0,01 N_f}{0,345}} \right) \left(1 - e^{\frac{3,37 - E_0}{m}} \right), \quad (1)$$

где $N_f = \frac{(g D^3 (\rho_f - \rho_g) \rho_f)^{\frac{1}{2}}}{\mu_f}$ - безразмерная обратная

вязкость.

$$m = \begin{cases} 10; & N_f > 250; \\ 69 N_f^{-0,35}; & 18 < N_f < 250; \\ 25; & N_f < 18; \end{cases} \text{ - функция числа } N_f.$$

Формула (1) позволяет совместить три возможных случая снарядного течения: случай преобладания сил вязкости, случай преобладания инерционных сил и в случае почти неподвижного пузыря преобладание сил поверхностного натяжения.

Для расчета теплообмена снарядов с жидким металлом используются следующие соотношения:

$$\alpha_{if} = 2\lambda_f / \delta_f, \quad \delta_f = D_h (1 - \sqrt{\phi}) / 2 \quad (2)$$

$$\alpha_{ig} = Nu \cdot \lambda_g / (D_h \sqrt{\phi}), \quad Nu = 0.023 \cdot Re_g^{0.8} Pr_g^{0.4} \quad (3)$$

Также представлены математические модели для описания одномерного течения двухфазной среды.

Первая модель построена на предположении равенства давлений газовой и жидкой фаз, данная модель обладает рядом достоинств и широко используется во многих компьютерных кодах [3]. Несмотря на свою популярность, предложенная модель не является гиперболической. Для устранения проблем, связанных с не гиперболическостью исходной системы уравнений, для численной реализации была выбрана схема с аппроксимацией конвективных членов разностью “против потока”. Предложенная схема имеет первый порядок точности и обладает большой аппроксимационной вязкостью, которая подавляет возникающие неустойчивости.

Вторая модель [4] предполагает, что давление в газовой и жидкой фазе различно. Данная модель – гиперболическая, что позволяет применять разностные схемы повышенной точности. Для численной реализации был выбран балансно-характеристический алгоритм, основанный на схеме “КАБАРЕ” [5].

В качестве иллюстраций приведены результаты расчетов аналитических тестов и экспериментов по движению пузырей в жидкости с использованием указанных схем (рисунок 1).

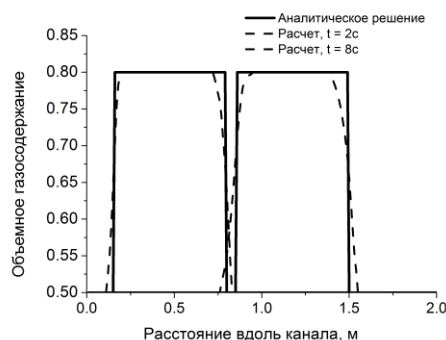


Рис. 1. Расчет движения снаряда в жидкости с использованием схемы “КАБАРЕ”

1. Одномерные двухфазные течения // Г. Уоллис; Москва: Издательство «Мир». 1972.
2. Dittus F.W., Boelter L.M. Heat transfer in automobile radiators of the tubular type // University of California Publication in Engng, 1930. V. 2. №13. P. 443--461
3. Ransom et al., RELAP5/MOD3 Code manual; NUREG/CR-5535, Idaho National Engineering Laboratory, 1995.
4. R. Saurel, R. Abgrall, A multiphase Godunov method for compressible multifluid and multiphase flows, J. Comp. Phys., 1999.
5. В. М. Головинин, Балансно-характеристический метод численного решения одномерных уравнений газовой динамики в Эйлеровых переменных // Матем. моделирование, том 18, № 11, с. 14–30, 2006

При размещении на кустовых площадках различных технических систем, используемых на северных нефтегазовых месторождениях, стремятся минимизировать влияние различных источников тепла на мерзлый грунт. Это связано с тем, что оттаивание вечной мерзлоты может сопровождаться просадками земной поверхности и развитием опасных мерзлотных геологических процессов, называемым термокарстом, который приводит к серьезным техногенным катастрофам. В работе рассматривается влияние эксплуатируемых факельных установок на процесс растепления вечной мерзлоты.

В соответствии с работами [1-12] моделирование процессов распространения тепла в грунте сводится к решению в заданной области трехмерного уравнения контактной (диффузионной) теплопроводности с неоднородными коэффициентами, включающее локализованную теплоемкость фазового перехода – подход, позволяющий решать задачу типа Стефана, без явного выделения границы фазового перехода. Уравнение для температуры $T(t, x, y, z)$ в грунте имеет вид

$$\rho(c_v(T) + k\delta(T - T^*)) \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda(T) \operatorname{grad} T).$$

В качестве граничного условия на поверхности грунта используется уравнение баланса потоков, приносящих и уносящих энергию, с учетом основных климатических факторов: среднемесячной температуры воздуха, мощности солнечного излучения и излучения от факельной установки.

$$f(x, y) + \alpha q + b(T_{air} - T|_{z=0}) = \varepsilon \sigma (T^4 - T_{air}^4) + \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0}.$$

В этом краевом условии функция $f(x, y)$ определяет плотность теплового потока от самой установки на поверхности грунта.

Разработанная численная методика была использована для моделирования влияния факельной установки на деградацию вечной мерзлоты на северных российских нефтегазовых месторождениях. Применение разработанного комплекса программ позволило выбрать наиболее оптимальные варианты теплоизоляции поверхности для уменьшения теплового влияния факельной системы на деградацию вечной мерзлоты.

1. Mikhail Yu. Filimonov, Nataliia A. Vaganova. Simulation of Thermal Fields in the Permafrost With Seasonal Cooling Devices // Proc. ASME. 45158, 2012. V. 4. P. 133-141.
2. Filimonov M.Yu., Vaganova N.A. Simulation of thermal stabilization of soil around various technical systems operating in permafrost // Applied Mathematical Sciences. 2013. V. 7, No. 144. P. 7151-7160.
3. Ваганова Н.А., Филимонов М.Ю. Прогнозирование изменений в вечной мерзлоте и оптимизация эксплуатации инженерных систем // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Математика, механика, информатика. 2013. Т. 13, No. 4. С. 37-42.
4. Filimonov M., Vaganova N. Prediction of changes in permafrost as a result technogenic effects and climate // Academic Journal of Science. 2014. V. 3, No. 1. P. 121-128.
5. Филимонов М.Ю., Ваганова Н.А., Гусарова В.В. Разработка математических моделей и программного обеспечения для описания природных и техногенных процессов в грунте при кустовом способе добычи углеводородов на северных нефтегазовых месторождениях // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сборник трудов (Казань, 20-24 августа 2015г.). Казань: Издательство Казанского (Приволжского) федерального университета, 2015. С. 3916-3918.
6. Filimonov M.Yu., Vaganova N.A. Simulation of Technogenic and Climatic Influences in Permafrost // Lect. Notes Comput. Sci. 2015. V. 9045. P. 178-185.
7. Vaganova N.A., Filimonov M.Yu. Computer simulation of nonstationary thermal fields in design and operation of northern oil and gas fields // AIP Conf. Proc. 2015. V. 1690. Paper 020016.
8. Vaganova N., Filimonov M. Parallel splitting and decomposition method for computations of heat distribution in permafrost // CEUR Workshop Proceedings. 2015. V. 1513. P. 42-49.
9. M.Yu. Filimonov, N.A. Vaganova. Simulation of permafrost changes due to technogenic influences of different engineering constructions used in northern oil and gas fields // Journal of Physics: Conference Series 754. 2016. 112004.
10. M. Filimonov, N. Vaganova. Short and Long Scale Regimes of Horizontal Flare System Exploitation in Permafrost // CEUR Workshop Proceedings. V. 1662. 2016. P. 253-26.
11. N.A. Vaganova, M.Yu. Filimonov. Different shapes of constructions and their effects on permafrost // AIP Conf. Proc. 2016. NY: AIP Publishing LLC. Vol. 1789. 020019.
12. Ваганова Н.А., Филимонов М.Ю. Моделирование динамики зон оттаивания многолетнемерзлых пород на кустовых площадках от добывающих скважин и инженерных объектов // Современные технологии извлечения нефти и газа. перспективы развития минерально-сырьевого комплекса (русский и мировой опыт. Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 85-летию доктора технических наук, профессора, академика РАН В.И. Кудинова. Министерство образования и науки Российской Федерации, ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет», Институт нефти и газа им. М.С. Гусериева. 2016. С. 210-222.

Работа поддержана РФФИ (грант № 16-01-00401)

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ПОДГОТОВКИ ТОПЛИВА И ВОЗДУХА НА ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПГУ-ВЦГ

Филиппов П.С., Левин Е.И., Рыжков А.Ф.

ФГАОУ ВО «Уральский Федеральный Университет
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург

E-mail: fps_proxi@mail.ru

В настоящее время по всему миру ведутся интенсивные научно-исследовательские и проектно-конструкторские работы по разработке парогазовых установок с внутрицикловой газификацией органического топлива (ПГУ-ВЦГ). В большинстве освоенных коммерческих ПГУ-ВЦГ газовое топливо (синтез-газ) получают в основном путём парокислородной газификации твердого топлива (низшая теплота получаемого синтез-газа 8.21-12.47 МДж/нм³). Только в трёх коммерческих ПГУ-ВЦГ (Pinon Pine, Nakoso, Kemper) имеется опыт использования воздушной газификации (низшая теплота получаемого синтез-газа Pinon Pine – 5.02, Nakoso – 4.77, Kemper – 4.4 МДж/нм³) [1, 2, 3]. С целью повышения экологических и экономических показателей в таких ПГУ-ВЦГ организуется подготовка синтез-газа к сжиганию в камере сгорания ГТУ. Под подготовкой понимается коррекция характеристик синтез-газа, т.е. придание ему определенных параметров (температуры, состава, модифицированного индекса Воббе). Коррекция характеристик синтез-газа выполняется путём его очистки от загрязнителей [3], вариации доли содержащихся в синтез-газе горючих компонентов [2, 4, 5], нагрева или охлаждения очищенного синтез-газа [3].

Вариация доли содержащихся в синтез-газе горючих компонентов выполняется следующими способами: 1. разбавлением синтез-газа инертными средами (азотом, водяным паром); 2. обогащением синтез-газа относительно высококалорийными газами; 3. повышением содержания водорода в синтез-газе по реакции водяного сдвига в shift-реакторе с удалением СО₂ или подачей водяного пара в газогенератор; 4. присадкой кислорода в дутьё газогенератора (в случае воздушной газификации).

В настоящее время во всех работающих ПГУ-ВЦГ применяется технология холодной газоочистки. В процессе такой газоочистки синтез-газ глубоко охлаждается (до 30-40 °С), из-за чего появляется необходимость его подогрева перед сжиганием в камере сгорания ПГУ-ВЦГ. Подогрев очищенного синтез-газа выполняется либо горячим неочищенным синтез-газом [4], либо питательной водой высокого давления из котла-утилизатора [5]. Повышение температуры процесса газоочистки (до 300-500 °С) позволяет отказаться от организации предварительного подогрева синтез-газа, что по данным [1] даёт прирост термического КПД всей ПГУ-ВЦГ на 1-2%.

Очистка синтез-газа включает в себя удаление из синтез-газа соединений серы и азота, ртути и др. При холодной газоочистке используют жидкие сорбенты, а при горячей – твердые сорбенты (для очистки от соединений серы, ртути, хлоридов) и катализаторы

(для очистки от соединений топливного азота). При горячей очистке синтез-газа от соединений азота используют специальные катализаторы на основе металлов. При использовании таких катализаторов могут возникнуть проблемы, связанные с нежелательным окислением содержащихся в синтез-газе горючих компонентов и отравлением катализаторов.

В данной работе проведен анализ возможности экологичного сжигания топливного газа в камере сгорания ПГУ-ВЦГ при переходе с освоенной (холодной) системы очистки синтез-газа на перспективную (горячую). Также в данной работе проведена оценка возможности отказа от очистки синтез-газа от соединений азота (оставив при этом остальные системы газоочистки) путем сравнения расчетных экологических показателей работы ПГУ-ВЦГ на очищенном и неочищенном от нитросоединений топливном газе.

Результаты численного моделирования показали, что при применении коррекции теплоты сгорания неочищенного от нитросодержащих соединений синтез-газа позволяет достичь выход NO_x ниже нормативного уровня ≈ 20 мг/нм³.

Отказ от узла очистки от нитросоединений при горячей газоочистке низкокалорийного синтез-газа позволяет получать выход NO_x ниже 50 мг/нм³. Для получения выхода NO_x < 25 ppm необходима очистка синтез-газа от нитросодержащих соединений, что требует, наряду с сероочисткой, установки блока каталитической нитроочистки.

1. Giuffrida A., Romano M.C., Lozza G. Thermodynamic analysis of air blown gasification for IGCC applications // *Applied Energy*. 2011. V. 88. № 11. P. 3949–3958
2. Nelson M., Rush R., Madden D. et. al. Kemper County IGCC Project Preliminary Public Design Report // *Preliminary Public Design Report*. 2012.
3. Low Emission Gas Turbine Technology for Hydrogen-rich Syngas. IGCC State-of-the-art report. // Department of Mech. & Structural Eng. & Material Science University of Stavanger. Norway, 2010. – 83 p. Jones 2002
4. Dodo S., Karishuku M., Yagi N. et. al. Dry Low-NO_x Combustion Technology for Novel Clean Coal Power Generation Aiming at the Realization of a Low Carbon Society // *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*. 2015. V. 52. №2. P. 24-31.
5. Thattai A.T., Oldenbroek V., Schoenmakers L. et. al. Experimental model validation and thermodynamic assessment on high percentage (up to 70%) biomass co-gasification at the 253 MWe integrated gasification combined cycle power plant in Buggenum, The Netherlands // *Applied Energy*. 2016. V. 168 P. 381-393.

Исследование выполнено в Уральском федеральном университете за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00524).

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОВЫХ ВОЛН В ЧЕРНОМ МОРЕ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ АТМОСФЕРНЫМИ ЦИКЛОНАМИ

Фомин В.В.

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь

E-mail: fomin@dntmm@gmail.com

Атмосферные циклоны являются одним из основных метеорологических факторов, способных генерировать экстремальные ветровые волны в морских бассейнах. Для каждого конкретного бассейна интенсивность ветровых волн определяется траекторией, интенсивностью и скоростью перемещения атмосферных циклонов [1].

Цель настоящей работы – исследование чувствительности полей ветровых волн в Черном море к изменению характеристик атмосферных циклонов на основе гидродинамического моделирования. Для Черного моря подобные исследования ранее не проводились.

Исследование выполнялось на основе адаптированной к Черному морю комплексной численной модели SWAN+ADCIRC [2], учитывающей взаимодействия ветровых волн, течений и вариаций уровня моря. Комплексная модель включает спектральную модель ветровых волн SWAN и гидродинамическую модель циркуляции вод ADCIRC. Расчеты выполнялись на неструктурированной расчетной сетке из ~158 тыс. узлов, охватывающей Азово-Черноморский бассейн. Шаг интегрирования по времени в SWAN составлял 600 с, в ADCIRC – 3 с. Коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости в ADCIRC равнялся $10 \text{ м}^2/\text{с}$. Общее время интегрирования составляло 96 ч. Расчеты проводились на вычислительном кластере МГИ РАН (hpc-mhi.org) с использованием технологии параллельных вычислений MPI.

В численных экспериментах поля скорости приводного ветра и атмосферного давления в циклоне задавались с помощью аналитической модели осесимметричного вихря [3]. Перепад давления между центром и периферией циклона ΔP , определяющий интенсивность ветрового волнения, изменялся в пределах 10 – 20 гПа. Скорость перемещения циклона C варьировалась в пределах 2 – 14 м/с. Моделировалась ситуация, когда циклон движется над глубоководной частью Черного моря с запада на восток по зональной траектории (центр циклона смещался вдоль широты $43,5^\circ$).

Анализ результатов численного моделирования показал, что поле высот значительных волн (SWH) имеет асимметричную структуру, характер которой определяется скоростью перемещения и интенсивностью циклона. Максимальные высоты волн генерируются на южной периферии циклона. Возрастание скорости движения циклона приводит к увеличению высоты волн зыби в западном секторе циклона.

Более быстрые циклоны генерируют ветровые волны меньшей высоты по сравнению с медленными циклонами. Площадь зон интенсивного ветрового волнения S пропорциональна перепаду атмосферного давления в циклоне. Примеры зависимостей от времени S для разных ΔP показаны на рис. 1. Здесь величина S определялась из условия: $\text{SWH} \geq 3,5 \text{ м}$.

Наибольшие значения максимумов SWH достигаются при скоростях перемещения циклона 7 – 9 м/с (рис. 2). Это усиление обусловлено совпадением характерных величин групповой скорости ветровых волн в глубоководной части Черного моря со скоростью распространения атмосферного циклона.

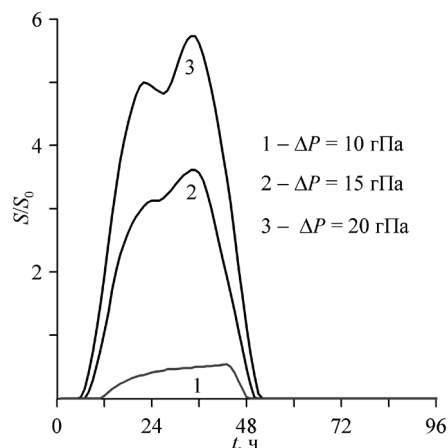


Рис. 1. Зависимость от времени площади интенсивного ветрового волнения S , нормированной на характерный масштаб S_0 , для трех значений ΔP при $C = 8 \text{ м/с}$

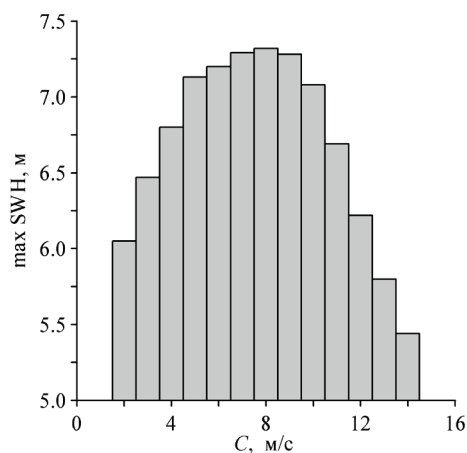


Рис. 2. Зависимость максимума высоты значительных волн (max SWH) от скорости перемещения атмосферного циклона C при $\Delta P = 15 \text{ гПа}$

1. Young I.R. A review of the sea state generated by hurricanes // Marine Structures. 2003. V. 16. No. 3. P. 201–218.
2. Dietrich J.C., Zijlema M., Westerink J.J. et al. Modeling hurricane waves and storm surge using integrally-coupled, scalable computations // Coastal Engineering, 2011, V. 58, No. 1, P. 45– 65.
3. Holland G.J. An analytic model of the wind and pressure profiles in Hurricanes // Mon. Wea. Rev. 1980. V.108. P. 1212–1218.

Работа выполнялась в рамках НИР МГИ РАН «Фундаментальная океанология» (№ 0827-2014-0010).

NUMERICAL SIMULATION OF THE IMPACT OF HIGH-SPEED METALLIC PLATES USING TWO APPROACHES

Fortova S.V.¹, Utkin P.S.¹, Pronina A.P.¹, Narkunas T.S.² and Shepelev V.V.¹

¹ Institute for Computer-Aided Design of the Russian Academy of Sciences, Moscow

² Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow Region

E-mail: sfortova@mail.ru

The work is devoted to the development of the authors software package Turbulence Problem Solver [1] originally created for the investigation of three-dimensional problems of hydrodynamic instabilities. Mathematical model is based on the three-dimensional multicomponent Euler equations, the numerical scheme on the grid-characteristics scheme of the second approximation order. The functionality of the mathematical models and the numerical schemes of the package are extended to consider intensive directed energies flows. The detailed description of the proposed numerical approach on the example of the problem of high-speed impact of two metal plates [2] is presented. The problem is solved using stiffened gas equation of state with the parameters calibrated using the data obtained with the use of wide-range equations of states for the metals. All the main features of the process are discussed, namely the

formation of two shock waves in the samples, their propagation and interaction with free boundaries of the samples with the formation of rarefaction waves as well as the complex behaviour of the contact surface between the metals.

1. Fortova S V, Kraginskii L M, Chikitkin A V and Oparina E I 2013 Math. Mod. Comp. Simulations 5(6) 607–616.
2. Yakovlev I V 1973 Fizika goreniy i vzryva 9(3) 447–452

The work is carried out with the support of the RFBR (Agreement No 17-01-00812\17), the computing part was supported by the RSF (Agreement No. 17-11-01293) and Program of Presidium of Russian Academy of Sciences "Fundamental problems of mathematical modeling".

Рассматривается неизомермическое заполнение плоского канала неньютоновской жидкостью. Область решения схематично изображена на рис. 1. Математическая постановка задачи включает систему уравнений движения, неразрывности и теплопроводности. Система замыкается степенным реологическим законом [1], согласно которому эффективная вязкость вычисляется по формуле

$$\mu = \mu_0 \exp[-k(T - T_0)] A^{n-1},$$

где μ – эффективная вязкость, μ_0 , k , n – реологические параметры, T – текущая температура, T_0 – заданная температура, A – интенсивность тензора скоростей деформаций.

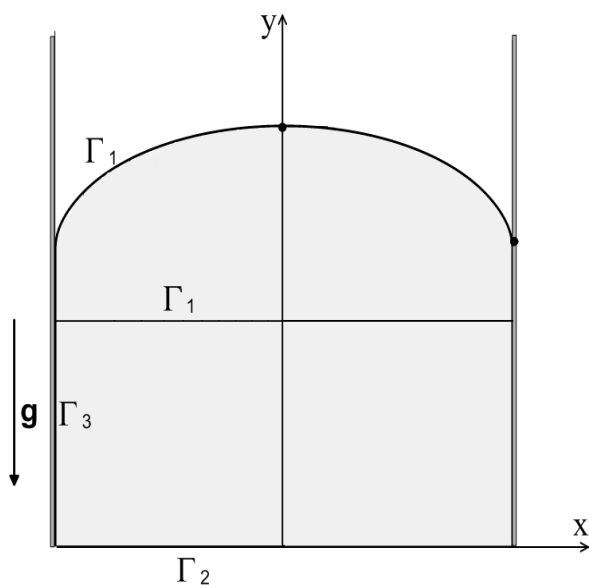


Рис. 1. Область решения.

Во входном сечении Γ_2 задаются профили скорости и температуры, соответствующие одномерному неизомермическому течению рассматриваемой жидкости в бесконечном канале с заданным постоянным расходом. На стенках Γ_3 выполняются условия прилипания, при этом температура равна T_1 . На свободной поверхности Γ_1 граничные условия заключаются в равенстве касательных напряжений нулю, нормальных – внешнему давлению и в отсутствии теплового потока. В начальный момент времени свободная поверхность имеет плоскую форму и расположена на некотором удалении от входной границы. Постановка задачи записывается в безразмерной форме, при этом значения безразмерных критериев выбираются такими, чтобы обеспечить существование стационарного решения для неизомермического течения в плоском бесконечном канале [2]. В математиче-

скую постановку задачи, записанную в безразмерных переменных, входят следующие безразмерные критерии: число Рейнольдса Re , число Фруда Fr , число Пекле Pe , число Бринкмана Bg , параметр экспоненциальной зависимости вязкости от температуры C

$$Re \frac{d\mathbf{u}}{dt} = -\nabla p + \nabla \cdot (2\bar{\mu}\mathbf{E}) + \frac{Re}{Fr},$$

$$Pe \frac{d\theta}{dt} = \Delta\theta + Bg \bar{\mu} \bar{A}^2,$$

$$\text{div } \mathbf{u} = 0,$$

$$\bar{\mu} = \exp(-C\theta) \bar{A}^{n-1},$$

где $\mathbf{u}$ – вектор скорости, t – время, p – давление, $\mathbf{E}$ – тензор скоростей деформаций, θ – температура.

Задача решается численно с использованием конечно-разностной методики, в основе которой лежит алгоритм SIMPLE [3] для расчета полей скорости, температуры и давления. Метод инвариантов [4] применяется для удовлетворения граничных условий на свободной поверхности. Последняя дискретизируется с помощью набора маркеров, равномерно расположенных вдоль нее. Условие отсутствия касательных напряжений и уравнение неразрывности записываются совместно, что позволяет использовать схему бегущего счета для расчета составляющих вектора скорости маркеров. Движение маркеров во времени определяется в соответствии с разностными аналогами кинематического условия.

Параметрические исследования проводились при малых Re и больших Re , характерных для течений полимерных жидкостей при их переработке методом литья. Продемонстрированы распределения динамических и кинематических характеристик течений в зависимости от значений Bg , соотношения Re/Fr , параметров реологической модели C и n .

1. В.И. Янков, В.И. Боярченко, В.П. Первадчук и др. Переработка волокнообразующих полимеров. Основы реологии полимеров и течение полимеров в каналах. – Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2008. 264 с.
2. А.М. Кутепов, А.Д. Полянин, З.Д. Запьянов и др. Химическая гидродинамика: Справочное пособие. – М.: Бюро Квантум, 1996. 336 с.
3. С. Патанкар. Численные методы решения задач теплообмена и механики жидкости: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
4. Г.Р. Шрагер, А.Н. Козлобродов, В.А. Якутенок. Моделирование гидродинамических процессов в технологии переработки полимерных материалов. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1999. 230 с.

Работа поддержана грантом Президента РФ (МК-710.2017.1) и РФФИ (грант № 15-08-02256)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СЛАБОНЕЛИНЕЙНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ВОЛН НА СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НЕГЛУБОКОГО СЛОЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

Архипов Д.Г.^{1,2}, Сафарова Н.С.¹ Хабахпашев Г.А.^{1,2}

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

² Новосибирский государственный университет

E-mail: theory@itp.nsc.ru

В статьях [1, 2] был предложен новый подход к моделированию динамики существенно трехмерных умеренно длинных возмущений свободной границы слоя идеальной жидкости, имеющих малую, но конечную амплитуду и бегущих под любыми углами друг к другу.

В данной работе исходная система уравнений неразрывности и движения вязкой несжимаемой жидкости сведена к одному основному эволюционному нелинейному уравнению (1) для возмущения свободной поверхности η и двум линейным уравнениям (2) для горизонтальной компоненты скорости жидкости $\mathbf{u}$, осредненной по глубине слоя, и ее потенциала φ :

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} - gh \nabla^2 \eta - \frac{g}{2} \nabla^2 \eta^2 - h \nabla^2 (\mathbf{u}^2) - \frac{h^2}{3} \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\nabla^2 \eta) - g \nabla \eta \cdot \nabla h + g \sqrt{\frac{v}{\pi}} \int_0^t \frac{\nabla^2 \eta dt'}{\sqrt{t-t'}} = \frac{1}{h} \sqrt{\frac{v}{\pi t}} \mathbf{c}_0 \cdot \nabla \eta_0, \quad (1)$$

$$\mathbf{u} = \nabla \varphi, \quad \nabla^2 \varphi = -(\partial \eta / \partial t) / h. \quad (2)$$

Здесь t – время, g – ускорение свободного падения, h – равновесная глубина слоя, ∇ – оператор градиента, определенный в горизонтальной плоскости xOy , v – кинематическая вязкость жидкости, $\mathbf{c}_0$ – вектор фазовой скорости волн, η_0 – начальное возмущение уровня слоя (при $t = 0$). Эта система уравнений пригодна не только для описания волн, распространяющихся в произвольных направлениях, но и учитывает диссипацию в нестационарном пограничном слое на дне бассейна. Результаты одного из расчетов представлены на рис. 1, где показано столкновение четырех уединенных возмущений, первоначально двигавшихся в центр бассейна с пологим дном при $h/h_\infty = 1 - 0,4 \exp(-[(x^*)^2 + (y^*)^2]/50^2)$.

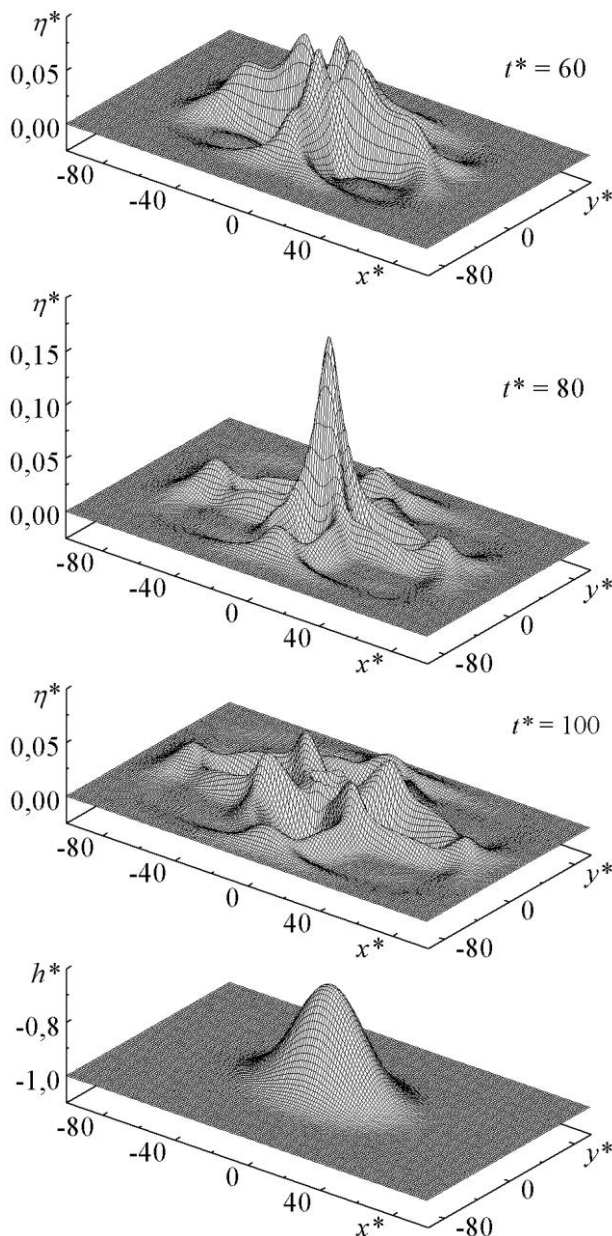
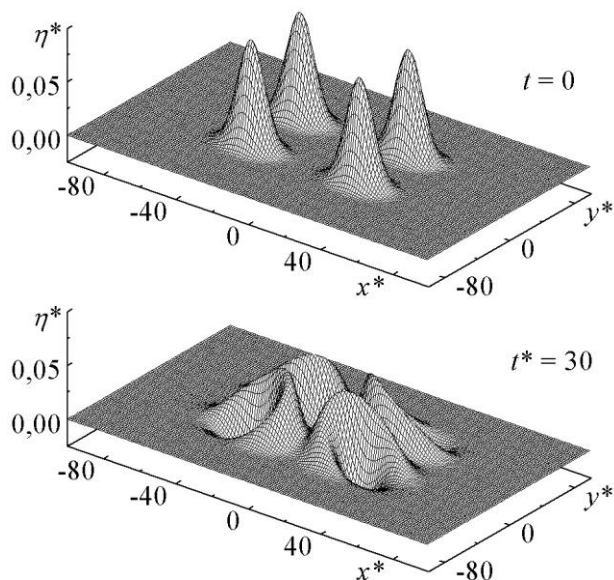


Рис. 1. Форма свободной поверхности ($\eta^* = \eta/h_\infty$) в 5 моментах времени ($t^* = t/(g/h_\infty)^{1/2}$) и форма дна ($h^* = -h/h_\infty$).

Список литературы:

1. Архипов А. Г., Хабахпашев Г. А. Новый подход к описанию пространственных нелинейных волн в диспергирующих средах // Доклады Академии наук. 2006. Т. 409, № 4. С. 476–480.
2. Arkhipov D. G., Khabakhpashev G. A., Safarova N. S. Combined approach to numerical simulation of spatial nonlinear waves in shallow water with various bottom topography // Notes on Num. Fluid Mech. and Multidiscipl. Design. 2011. Vol. 115. P. 297–312.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-22-00174).

МОДЕЛИРОВАНИЕ САМОДИФФУЗИИ В ГАЗАХ И ЖИДКОСТЯХ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

Харламов Г.В.¹, Жилкин С.В.²

¹ Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Новосибирск

² ООО ИМ Инжиниринг Сервисез, Новосибирск

E-mail: g_kharlamov@ngs.ru

Моделирование диффузии в газах и жидкостях методами прямого численного моделирования имеет как теоретический, так и практический интерес. С одной стороны это дает возможность проверить теории и гипотезы, которые используются в физике жидкостей и газов. С другой, позволяет получить новую информацию о механизмах диффузии в таких системах.

В работе рассчитывались коэффициенты самодиффузии в молекулярной системе леннард-джонсовских частиц методом молекулярной динамики. Сначала вычислялись зависимости автокорреляционных функций скорости частиц от времени. Затем вычислялись коэффициенты самодиффузии по формуле Грина – Кубо. Расчеты проведены в широком диапазоне плотностей и температур системы. Особое внимание уделено расчетам систем в области фазового перехода пар – жидкость. Результаты расчетов сравнивались с экспериментальными данными.

Все расчеты проводились в безразмерных единицах: расстояние – $r = r^*/\sigma_0$, температура – $T = kT^*/\varepsilon$, энергия – $U = U^*/\varepsilon$, концентрация (плотность) – $\rho = \rho^* \sigma_0^3$, время – $t = t^*/\sigma_0(\varepsilon/m_0)^{1/2}$. Здесь σ_0 и ε – параметры потенциала Леннарда-Джонса, m_0 – масса молекулы. Переменные, отмеченные «звездочкой», являются размерными.

Временная зависимость автокорреляционных функций скорости молекул зависит от плотности и температуры системы. Для систем низкой плотности наблюдаются экспоненциальные зависимости автокорреляционных функций, а коэффициенты самодиффузии соответствуют выводам теории Больцмана – Чепмена – Энскога. Для систем средней плотности проявляются характерные степенные хвосты автокорреляционных функций скорости. Для плотных систем температурная зависимость автокорреляционной функции скорости молекул демонстрирует характерные для жидкостей отрицательные области. Автокорреляционная функция в двухфазных системах состоит из двух участков с сильно различающимися временами релаксации, один из которых – экспоненциальный, связан с диффузией молекул в паре, а другой в жидких каплях.

Ранее в наших работах [1, 2] была обнаружена универсальная зависимость приведенного коэффициента диффузии (по отношению к коэффициенту диффузии Больцмана – Чепмена – Энскога) от плотности в однородных системах малой и средней плотности. Это выражалось в независимости приведенного коэффициента от температуры системы. Очевидно, что это обусловлено одним и тем же механизмом релаксации скорости молекул в таких системах, связанным

с парными столкновениями молекул друг с другом. Отклонения от этой зависимости наблюдаются в области образования второй фазы – капелек жидкости в паре или пузырьков пара в жидкости, при этом образование капелек в паре приводит к уменьшению, а образование пузырьков в жидкости – к увеличению коэффициента диффузии по сравнению с коэффициентами диффузии в однородной системе при тех же условиях.

Однако для плотных систем (жидкостей) наблюдается температурная зависимость приведенного коэффициента самодиффузии от температуры. Анализ этой зависимости показал, что в плотных системах проявляется новый механизм диффузии. Температурная зависимость коэффициента диффузии при этом механизме является линейной (см. рис. 1). Следовательно, этот механизм не может быть прыжковым, для которого должна наблюдаться «аррениусовская» зависимость коэффициента диффузии. В работе обсуждаются различные модели диффузии в жидкостях, которые могут привести к линейной температурной зависимости коэффициентов диффузии.

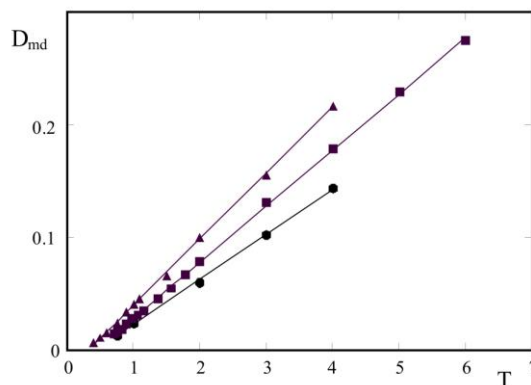


Рис. 1. Зависимости коэффициентов самодиффузии, рассчитанных методом молекулярной динамики, от температуры для различной плотности леннард - джонсовской жидкости: ● – $\rho = 0.782$; ■ – $\rho = 0.845$; ▲ – $\rho = 0.888$.

Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными по диффузии, как в газообразном, так и в жидком аргоне показало хорошее согласие [1].

1. Жилкин С.В., Харламов Г.В. Исследование диффузии леннард-джонсовских частиц в условиях фазового перехода методом молекулярной динамики. // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 2. С. 138-142.
2. Kharlamov G.V., Zhilkin S.V. Molecular dynamics simulation of self-diffusion of gases and liquids in conditions of phase transition. // Proc. World congress on engineering and computer science, WCECS 2016, USA, San Francisco, V. 2. P. 554-559.

Цвелодуб О.Ю.^{1,2}, Бочаров А.А.³¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск² Новосибирский государственный университет³ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН

E-mail: tsvel@itp.nsc.ru

Рассматриваются нелинейные волны на пленке жидкости, стекающей под действием силы тяжести, в известном поле напряжений на границе раздела фаз, обусловленным спутным течением газа.

на границе раздела фаз. Течение газа является турбулентным и происходит в вертикальном канале.

В случае, когда функция $y = h(x, t)$, определяющая положение точек границы области является однозначной, существует непрерывно дифференцируемое преобразование координат, переводящее область течения жидкости в полосу постоянной толщины:

$$x = x, \quad \eta = y / h(x, t), \quad t = t. \quad (1)$$

Система координат (1) неортогональна, поэтому обычная векторная формулировка уравнений для нее неприменима. Для вязкой пленки жидкости, свободно стекающей по вертикальной плоскости, преобразование (1) было выполнено в работе [1] для системы уравнений гидродинамики, выписанной в тензорной форме, инвариантной относительно систем координат. В работе [2] этим же методом была получена модельная система уравнений, описывающая эволюцию длинноволновых возмущений границы раздела при умеренных числах Рейнольдса для стекающей пленки жидкости, увлекаемой турбулентным потоком газа.

В случае малых расходов ($Re \sim 1$), вследствие малости толщины пленки по сравнению с длиной волны, решение этой системы представлялось в виде рядов по малому параметру. В результате, ограничиваясь в этом разложении двумя первыми членами, было получено одно эволюционное уравнение для толщины пленки. Из него для решений малой, но конечной амплитуды получается более простое уравнение на отклонение толщины пленки от невозмущенного уровня, которое, после соответствующих преобразований, записывается в следующем виде [2]:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + 2H \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^4 H}{\partial x^4} + B \int_{-\infty}^{\infty} ik^2 \tau(k) \hat{H}(k, t) e^{ikx} dk = 0 \quad (2)$$

Здесь H – преобразованное отклонение толщины пленки от невозмущенного уровня, $\tau(k)$ – Фурье-компоненты пульсаций напряжений газа, обусловленные криволинейностью границы раздела, $\hat{H}(k)$ – Фурье-компоненты разложения преобразованной формы поверхности, B – параметр задачи, содержащий в себе безразмерные комплексы задачи.

Таким образом, в случае малых чисел Рейнольдса задача исследования возмущений на поверхности

вертикальной пленки тяжелой жидкости, увлекаемой потоком газа, сводится к рассмотрению решений одного нелинейного интегро-дифференциального уравнения.

В работе [3] аналитически построены слабо нелинейные решения уравнения (2) в окрестности нейтральных волновых чисел, исследован характер ветвления волн от невозмущенного решения. Там, используя эти аналитические результаты, для нескольких значений параметра B методом установления численно были рассчитаны периодические стационарно бегущие волны первого семейства решений.

В настоящей работе, используя методы теории устойчивости, проведен бифуркационный анализ стационарно бегущих решений уравнения (2). В результате найдены новые семейства таких решений, в том числе и те, которые в пределе малых волновых чисел переходят в положительные солитонные решения.

1. Алексеенко С.В., Архипов Д.Г., Цвелодуб О.Ю. Дивергентная система уравнений для пленки жидкости, стекающей по вертикальной плоскости // Доклады АН. 2011. Т.436, № 1. С. 43–46.
2. Вожаков И. С., Архипов Д. Г., Цвелодуб О. Ю. Моделирование нелинейных волн на поверхности тонкой пленки жидкости, увлекаемой турбулентным потоком газа // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, № 2. С. 201–212.
3. Tselodub O. Yu. Simulating nonlinear steady-state traveling waves on the falling liquid film entrained by a gas flow // Journal of Physics: Conference Series, 2016, Vol. 754. – P. 032020-1–032020-5, DOI 10.1088/1742-6596/754/3/032020.

Работа поддержана РФФ (грант № 16-19-10449).

Чемезов А.В.¹¹ Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск

E-mail: atchemezov@mail.ru

В России принят ряд законодательных актов направленных на количественное определение выбросов парниковых газов (в эквиваленте диоксида углерода CO₂) организациями, осуществляющими хозяйственную и иную деятельность на территории Российской Федерации, а так же к 2020 году снижения выбросов CO₂ до уровня не более 75 процентов объема указанных выбросов в 1990 году, утвержденного распоряжением Правительства Российской Федерации от 2 апреля 2014 г. №504-р.

В связи со значительной ролью эмиссии CO₂ от энергетического использования ископаемого топлива в общих выбросах парниковых газов, основные мероприятия по сокращению парниковых газов в России будут связаны в первую очередь с проектами снижения выбросов CO₂ в энергетическом секторе страны.

Существенный вклад в выбросы парниковых газов вносит сжигание топлива на электростанциях (в настоящее время они дают 35-36% общих выбросов CO₂ в стране). В перспективе эта доля будет постепенно увеличиваться. При этом основным источником роста выбросов парниковых газов на электростанциях будет уголь.

Оценка выбросов CO₂ в электроэнергетическом секторе в долгосрочной перспективе позволяет более обоснованно судить о потенциальных возможностях выполнения Россией принимаемых обязательств. В свою очередь анализ выбросов парниковых газов в территориальном разрезе позволяет выявить наиболее неблагоприятные регионы, наметить мероприятия по их сокращению, разработать методы и критерии их отбора и тем самым определить возможный потенциал снижения суммарных выбросов парниковых газов, как по отдельным территориям, так и по России в целом [5].

Основными направлениями снижения выбросов CO₂ тепловыми электростанциями, работающими на органическом топливе являются:

1. Использование топлива с малым содержанием углерода, т.е. например, замена угля и мазута природным газом. Эти мероприятия требуют сравнительно небольших капитальных вложений и технологических изменений на самой станции, но ограничены по масштабам применения (необходим трубопроводный газ) и дает сокращение выбросов CO₂ не более 40-50%.

2. Снижение расходов сжигаемого топлива благодаря реализации технических решений, повышающих КПД энергоблоков, и/или внедрению на ТЭС более современных технологий, характеризующихся меньшей энергоемкостью. В настоящее время этот путь, довольно экономичный, представляется российским энергетикам наиболее предпочтительным. Однако, согласно оценкам специалистов, он может

привести к уменьшению эмиссии CO₂ относительно современного уровня только на 20-30%.

3. Третье направление позволяет кардинально решить проблему выбросов углекислого газа энергоустановками. Извлечение диоксида углерода из дымовых газов ТЭС и его последующее захоронение (подземное или подводное складирование, использование в различных технологических процессах). Такой путь (с использованием очистки дымовых газов ТЭС от CO₂) позволяет сократить его эмиссию в атмосферу энергоустановками на 80...99 % [1-3] и рассматривается зарубежными энергетиками как наиболее эффективный способ защиты окружающей среды [4]. К настоящему времени многие программы по извлечению CO₂ из газовых потоков уже реализованы в Норвегии, Великобритании, Дании, США, Японии и Китае [4].

В работе рассмотрена проблема снижения выбросов CO₂ в атмосферу при использовании угля на электростанциях. Представлен термодинамический анализ различных способов улавливания CO₂ в процессе сжигания угля в паротурбинных и парогазовых энергетических установках.

Дается технико-экономическая оценка методов очистки дымовых газов при сжигании угля на тепловых электростанциях от диоксида углерода. Выполнен сравнительный анализ дополнительных затрат при различных технологиях улавливания CO₂ в процессе сжигания угля.

Приводится предварительная технико-экономическая оценка технологии захоронения CO₂, а также оценены мероприятия по сокращению выбросов CO₂ в электроэнергетике России и получена стоимость сокращения 1 т CO₂ для различных энергетических технологий, что позволило выявить рациональные направления научно-технического прогресса в производстве электроэнергии и оценить последствия для окружающей среды от их внедрения.

1. В.М. Батенин, В.М. Масленников, Ю.А. Выхубенко и др. Сравнительный технико-экономический анализ вариантов использования угля в парогазовой установке с минимальными выбросами диоксида углерода в атмосферу // Теплоэнергетика. 2007. №1. С.24-30.
2. В.М. Масленников, Э.А. Цалко, В.Я. Штеренберг. Сравнительный термодинамический анализ альтернативных технологий использования угля в парогазовой установке при минимизации выбросов диоксида углерода в атмосферу // Теплоэнергетика. 2007. №1. С.24-30.
3. Н.Н. Ежова, С.В. Сударева. Современные методы очистки дымовых газов тепловых электростанций от диоксида углерода // Теплоэнергетика. 2009. №1. С.14-19.
4. Projected Costs of Generating Electricity. 2015 Edition. IEA&NEA. – 2015. – 215 p.
5. Tchemezov A.V. Saneev B.G, Lagerev A.V. Outlooks of Russia's power industry development in the 21st century and greenhouse gas emissions // International Journal of Energy Technology and Policy. Vol. 20. Issue 4 - <http://dx.doi.org/10.1504/IJGET.2003.004411>

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БУРЫХ УГЛЕЙ МАГАДАНСКОЙ ОБЛАСТИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ВОДОРОДА

Тальгамер Б.Л.¹, Чемезов А.В.², Чемезова Е.Ю.³

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск

² Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск

³ Геологоразведочный техникум ИРНТУ, Иркутск

E-mail: talgamer@istu.edu

В последнее время большой интерес привлекает использование водорода в качестве альтернативного энергоносителя. Высокая удельная энергоемкость (142 МДж/кг, что втрое больше, чем у традиционных жидких углеводородов), отсутствие вредных продуктов при окислении водорода кислородом, возможность проведения такого процесса в топливных элементах, т.е. путем прямого преобразования химической энергии в электрическую с КПД более 50 % – все это обуславливает рост исследований в области водородных энергетических технологий. Одна из ключевых проблем, сдерживающих практическое использование водорода во многих областях, связана с высокой стоимостью производства и невысокой эффективностью его хранения и транспортировки.

В работе рассматривается эффективность использования бурых углей с месторождений Ланковское и Мелководнинское Магаданской области для создания комплексного производства по переработке углей для производства водорода и его экспорта в Японию.

Япония реализует «Стратегическую «дорожную карту» по водороду и топливным элементам» [1, 2]. Предполагается основной упор сделать на использование водорода в топливных элементах на автомобильном транспорте. Однако с целью снижения издержек также рассматривается возможность использовать водород в энергетике. Реализуя проекты по строительству распределенной генерации для производства электроэнергии и тепла единичной мощностью от десятков киловатт до нескольких мегаватт (обеспечение отдельных домов или микрорайонов).

Косвенными результатами использования водорода является то, что при его использовании не выделяется CO₂ и другие вредные вещества. При массовом использовании водорода так же приведет к заметному сокращению выбросов CO₂ в Японии и улучшению экологической ситуации в городах.

Известно более десятка промышленно освоенных способов получения водорода. Наиболее распространена паровая конверсия метана, на долю которой приходится 48 % производимого в мире водорода. Около 30 % водорода получают путем паровой конверсии тяжелых нефтей и нафты. Газификация угля занимает третье место – 18 %. В этих процессах получают технический водород с содержанием 95-98 %. Для специальных целей водород с чистотой 99,6 % и выше производят электролизом – менее 4 %. Приоритеты среди альтернативных способов получения водорода определяются эффективностью использования первичной энергии, которая составляет, %: конверсия метана – 70-80, конверсия тяжелых углеводородов – 70, газификация угля – 55-60, электролиз – 30-40.

При переработке бурого угля применяется один из описанных выше вариантов газификации, получаемый синтез-газ подвергают реакции сдвига $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + \text{H}_2$, после чего с использованием газовых мембран выделяют водород. Единичная мощность установок, как правило, от нескольких десятков до нескольких сотен мегаватт по исходному топливу, однако при необходимости имеется техническая возможность создавать установки от 0,5 МВт [3]. Особенностью производства водорода является необходимость его привязки к производству-потребителю. Препятствием к использованию водорода в качестве топлива выступает полное отсутствие инфраструктуры транспорта и потребления, не разработаны технические стандарты безопасности.

Перспективной областью применения считается сжигание водорода в мобильных и стационарных энергоустановках на базе топливных элементов.

На основе обзора зарубежного опыта производства водорода [3, 5, 6], выделены основные технико-экономические показатели работы оборудования по производству водорода и сопутствующих продуктов. Предложена концепция создания комплексного производства по переработке низкосортных углей Магаданской области, с возможностью использования CO₂ для добычи нефти и газа, а также строительства терминала по отгрузке водорода на газовозы [7].

Проведена оценка необходимых капиталовложений для реализации этого проекта.

Дана зависимость стоимости синтез-газа для производства водорода как функция стоимости угля.

Сделаны выводы об эффективности использования бурых углей Магаданской области при производстве водорода и возможности экспорта в Японию.

1. Strategic Road Map for Hydrogen and Fuel Cells - http://www.meti.go.jp/english/press/2014/0624_04.html
2. Energy Policies of IEA Countries. Japan 2016 Review. 2016. IEA. – 183 p.
3. Введение в водородную энергетику / Э.Э. Шпильрайн, С.П. Малышенко, Г.Г. Кулешов; Под ред. В.А. Легасова. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 264 с.
4. Technology Roadmap. Hydrogen and Fuel Cells. IEA. 2015. – 81 p.
5. Garcia D. A. Analysis of non-economic barriers for the deployment of hydrogen technologies and infrastructures in European countries // International journal of hydrogen energy 2017. V.42 P. 6435-6447.
6. Aziz M., Zaini I. N., Oda T. Energy conservative brown coal conversion to hydrogen and power based on enhanced process integration: Integrated drying, coal direct chemical looping, combined cycle and hydrogenation // International journal of hydrogen energy 2017. V.42 P. 2904-2913.
7. Ahn J., You H., Ryu J., Chang D. Strategy for selecting an optimal propulsion system of a liquefied hydrogen tanker // International journal of hydrogen energy 2017. V.42 P. 5366-5380.

Технология электроконтактного спекания используется для изготовления твердосплавных композиций. Данный метод позволяет получать материалы с высокими механическими свойствами из отходов производства. Преимущество данного метода в сравнении с горячим прессованием состоит в более однородном распределении состава и свойств, а также минимальному количеству пор. Между тем, экспериментальное исследование процессов, протекающих в ходе спекания, является затруднительным ввиду многостадийности и разномасштабности совместно проявляющихся эффектов. Поэтому моделирование процессов, происходящих в ходе спекания, является актуальным.

Одним из эффектов, оказывающих влияние на однородность состава, является термодиффузия (эффект Соре). Так, в работах [1] анализируется влияние эффекта Соре на движение пор в композиции, находящейся в электрическом поле. Между тем, проявление этого эффекта может влиять не только на движение пор, но и способствовать образованию контакта между частицами еще в самом начале процесса.

Исследуем влияние эффекта Соре на диффузионное соединение частиц. Полагаем, что вследствие резистивного нагрева между частицами выделяется тепло. Рассмотрим начальную стадию (до $1 \cdot 10^{-9}$ с), когда область прогрева (до 5 мкм) и диффузии много меньше характерного размера спекаемых частиц, их граница контакта сплошная, а выделяющийся в ней поток тепла q распределен равномерно. В таких условиях задачу допустимо принять одномерной.

Математическая модель включает систему уравнений теплопроводности и диффузии для каждой из областей:

$$c_k \rho_k \frac{\partial T_k}{\partial t} = \lambda_k \frac{\partial^2 T_k}{\partial x^2};$$

$$\frac{\partial C_k}{\partial t} = D_k \frac{\partial^2 C_k}{\partial x^2} + D_{Tk} \frac{\partial^2 T_k}{\partial x^2},$$

здесь $k=1$ для $-\infty < x \leq 0$, $k=2$ для $0 < x \leq \infty$, c_k – теплоемкость, ρ_k – плотность, λ_k – теплопроводность, D_k – коэффициент диффузии, D_{Tk} – коэффициент термодиффузии, T_k – температура, C_k – концентрация диффузанта.

В начальный момент времени $t=0$ температуры и состав известны:

$$T_k = T_0; C_k = C_{0k}.$$

Вдали от зон контакта $x \rightarrow \pm\infty$ стоки тепла и массы отсутствуют:

$$-\lambda_k \frac{\partial T_k}{\partial x} = 0; -D_k \frac{\partial C_k}{\partial x} - D_{Tk} \frac{\partial T_k}{\partial x} = 0.$$

На границе контакта $x=0$ потоки массы равны

$$D_1 \frac{\partial C_1}{\partial x} + D_{T1} \frac{\partial T_1}{\partial x} = D_2 \frac{\partial C_2}{\partial x} + D_{T2} \frac{\partial T_2}{\partial x},$$

различие между концентрациями обусловлено разным коэффициентом диффузионной активности γ в областях 1 и 2

$$C_1 = \gamma C_2,$$

вследствие резистивного нагрева выделяется тепло

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} - \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = q.$$

В случае, когда тепловой контакт идеальный, температуры одинаковы

$$T_1 = T_2.$$

В случае, когда на границе контакта присутствует примесь или окисный слой малой толщины δ (и теплопроводностью λ), имеем

$$T_1 - T_2 = -\frac{\delta}{\lambda} \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x}.$$

Задача решена аналитически с использованием операционного метода. Анализ полученного решения выявил следующие параметры, характеризующие вклад эффекта Соре в процесс перераспределения концентрации:

$$a_k = \frac{\lambda_k}{c_k \rho_k}; K_a = \frac{a_2}{a_1}; K_D = \frac{D_1}{D_2}; Le = \frac{a_1}{D_1};$$

$$K_{Tk} = \frac{D_{Tk}}{D_1} \frac{q}{\lambda_1} \sqrt{a_1 t}; V_k = \frac{K_{Tk} K_D}{Le K_a K_D - 1}.$$

Здесь $D_{Tk}/D_1 = S_{Tk}$ – коэффициент Соре, комплексы K_{Tk} и V_k являются аналогами термодиффузионного соотношения $k_T = \nabla C / \nabla T$ и термодиффузионной постоянной $\alpha_{ik} = \nabla \ln(C_i / C_k) / \nabla \ln T$.

Анализ результатов показывает, что в отсутствие эффекта Соре распределение концентрации диффузанта монотонно. Термодиффузия не оказывает значительного влияния на ширину диффузионной зоны, однако приводит к появлению экстремумов на кривой распределения концентрации. Ширина диффузионной зоны тем больше, чем меньше Le .

Неидеальный контакт приводит к увеличению температуры в одной из областей и повышению градиента температуры. В этом случае в области с повышенной температурой диффузия ускоряется, а в противоположной области – замедляется, появляется разрыв на кривой распределения концентраций. Варьирование γ также приводит к появлению разрыва на кривой распределения концентрации.

Таким образом, эффект Соре приводит к оттоку диффузанта от зоны контакта, способствуя образованию соединения.

1. Olevsky E., Froyen L. Influence of thermal diffusion on spark-plasma sintering // J. Amer. Ceram. Soc. 2009. V. 92. P. 122–132.

Черданцев М.В.¹, Черданцев А.В.^{1,2}, Исаенков С.В.^{1,2}, Маркович Д.М.^{1,2}¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск² Новосибирский государственный университет

E-mail: mikhail.cherdantsev@gmail.com

Дисперсно-кольцевым называется газожидкостное течение в канале, продуваемом высокоскоростным потоком газа, при этом жидкость течет вдоль стенок канала в виде пленки и присутствует в газовом потоке в виде капель. Волновая структура пленки жидкости представлена крупномасштабными волнами возмущения, разделенными остаточным слоем, и мелкомасштабными волнами ряби, покрывающими всю поверхность пленки. Волны ряби формируются на задних склонах волн возмущения. Часть из них движется медленнее волн возмущения и, поэтому, выходит на остаточный слой между волнами возмущения. Другая их часть, напротив, движется быстрее и выходит на гребни волн возмущения, после чего срывается в газовый поток (Alekseenko et al., 2008). Наличие волн ряби на остаточном слое и на волнах возмущения оказывает влияние на коэффициент трения в канале (Schubring & Shedd, 2011). Таким образом, волны возмущения оказывают существенное влияние на интегральные характеристики потока.

Большая часть работ посвящена исследованию дисперсно-кольцевого участка на больших расстояниях от входа в канал, т.е., в области установившегося течения. Для построения и валидации физических моделей течения необходимы экспериментальные данные о формировании и развитии волн возмущения.

Исследование развития течения проводилось в круглом канале с внутренним диаметром 11,7 мм на расстояниях от 0 до 500 мм от входа в канал. Для измерения толщины пленки жидкости был использован метод лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ). Этот метод позволяет проводить полевые измерения толщины пленки жидкости на участке длины канала с высоким пространственным и временным разрешением.

В Alekseenko et al. (2015) при помощи метода ЛИФ обнаружено, что формирование волн возмущения происходит благодаря слиянию начальных высокочастотных волн. В данной работе эксперименты в трехмерной постановке показали, что начальные высокочастотные волны являются двумерными. Они быстро распадаются на множество трехмерных волн, которые объединяются друг с другом, формируя волны возмущения. Были изучены изменения частот и скоростей волн возмущения. Средняя скорость волн возмущения может быть определена кросскорреляционным методом. Сформировавшиеся волны возмущения движутся с постоянным ускорением, благо-

даря касательному напряжению трения со стороны газа. В виду того, что скорость газа на порядок выше скорости волн возмущения, сила, действующая на волны, остается практически постоянной. Но с ростом расстояния от входа в канал наблюдается потеря ускорения (см. рис. 1). Чем выше скорость газа, тем раньше начинаются как формирование волн возмущения, так и потеря ускорения.

Была обнаружена линейная зависимость между потерей ускорения волн возмущения и интенсивностью уноса жидкости с поверхности пленки с расстоянием от входа в канал.

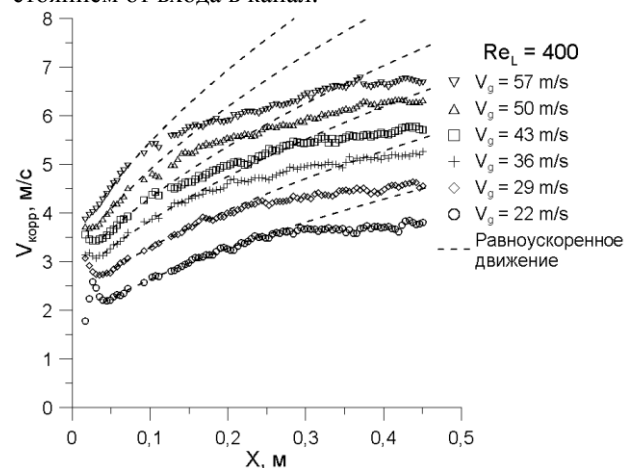


Рис. 1. Зависимость кросс-корреляционной скорости от расстояния от входа в канал. Число Рейнольдса жидкости $Re_L = 400$.

Было предложено объяснение замедления волн возмущения за счет уменьшения их амплитуды в связи с уносом жидкости с их гребней и снижения степени воздействия потока газа на волну возмущения.

1. Alekseenko, S. V., Antipin, V. A., Cherdantsev, A. V., Kharlamov, S. M., Markovich, D. M., Investigation of waves interaction in annular gas-liquid flow using high-speed fluorescent visualization technique // Microgravity Sci. Technol., 2008. V. 20, P. 271–275
2. S. V. Alekseenko, A. V. Cherdantsev, M. V. Cherdantsev, S. V. Isaenkov, D. M. Markovich Study of formation and development of disturbance waves in annular gas-liquid flow // Int. J. Multiphase Flow, 2015. V. 77, P. 65–75
3. D. Schubring, T.A. Shedd A model for pressure loss, film thickness, and entrained fraction for gas-liquid annular flow // Int. J. Heat and Fluid Flow, 2011. V. 32, P. 730–739

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 16-19-10449).

НЕРАВНОВЕСНЫЙ МЕХАНИЗМ РОСТА ГАЗОВОГО ПУЗЫРЬКА В ВЫСОКОВЯЗКОМ ГАЗОНАСЫЩЕННОМ РАСПЛАВЕ**Чернов А.А.^{1,2}, Пильник А.А.¹, Давыдов М.Н.²**¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск² Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, НовосибирскE-mail: chernov@itp.nsc.ru

Уже несколько десятилетий особое внимание исследователей привлекает проблема вулканических извержений. Это обусловлено, прежде всего, необходимостью прогноза и определения степени потенциальной опасности конкретных вулканов. Особый интерес представляют вулканы, тип извержения которых носит наиболее разрушительный, эксплозивный характер. Извержение таких вулканов хоть и достаточно редко, но сильно непредсказуемо и наиболее катастрофично. 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. Можно с уверенностью констатировать только факты фазовых переходов и разрушения изначально сплошного магматического потока. Кроме того, современными методами начало самого извержения может быть предсказано только по косвенным признакам. Поэтому, последовательное и как можно более строгое 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 особенно актуальным.

На данный момент времени существует множество работ, посвященных экспериментальному и математическому моделированию вулканических извержений как в общей постановке, так и сопровождающих данное явление отдельных процессов в частности. К одному из них относится процесс кавитации магмы в волнах разгрузки, во многом определяющий структуру формирующегося в канале вулкана двухфазного потока, а, следовательно, характер и тип извержения. В связи с этим задача полного описания кинетики нуклеации и роста газовых пузырьков, образующихся в магматическом расплаве при его быстрой декомпрессии, является ключевой.

Вообще говоря, исследование кавитационных процессов в жидкостях имеет уже столетнюю историю. Начало этому положено в работах Рэлея. Начиная с работ Спаркса, проблемой роста газовых пузырьков в магматических расплавах вплотную заинтересовались геофизики, и это вылилось в отдельное направление. Дело в том, что данный процесс здесь имеет свою специфику, ввиду ряда уникальных физико-химических свойств, присущих только магматическим расплавам. Это, прежде всего, большое содержание в них растворенных летучих компонентов

(концентрация которых может достигать нескольких процентов по массе, в зависимости от давления, при котором происходило насыщение), а также высокую вязкость, которая варьируется в очень широком диапазоне значений, в зависимости от концентрации растворенного газа и доли содержащихся в ней кристаллитов. Это накладывает некоторые ограничения на применимость тех или иных, как правило, равновесных моделей и требует дальнейших исследований. До сих пор не существует модели, или точнее решения, которое бы в точности описывало механизм роста пузырька в магматическом расплаве в широком диапазоне параметров процесса (главным из которых является пересыщение магмы после декомпрессии), на всех временах, в том числе в сильно неравновесных условиях. Последнее обусловлено высокой вязкостью магмы и возможным нестационарным внешним воздействием.

В настоящей работе исследован механизм роста одиночного газового пузырька в высоковязкой газонасыщенной жидкости при ее быстрой декомпрессии. Предложена математическая модель данного процесса, представляющая собой нестационарную диффузионную задачу, решаемую совместно с динамической. Динамика роста пузырька описывается модифицированным уравнением Рэлея-Плессета, учитывающим неоднородность вязкости жидкости, обусловленной формированием вокруг пузырька диффузионного пограничного слоя. Найдено аналитическое решение задачи, хорошо согласующееся с численным в широком диапазоне пересыщений на всех стадиях процесса, включая неравновесную, учет которой крайне необходим, если рассматривать высоковязкие среды. Найдены зависимости профиля концентрации растворенного в жидкости газа, давления газа в пузырьке, скорости изменения массы газа в пузырьке (скорости дегазации), а также скорости роста пузырька от времени. Показано, что по прошествии определенного времени давление газа в пузырьке стремится к давлению окружающей жидкости (диффузионная стадия процесса). Концентрация растворенного в жидкости газа при этом становится функцией только одной переменной, а решение краевой задачи - автомодельным. Отметим, что данное решение является точным. Показано, что решение, полученное ранее другими авторами в приближении квазистационарности процесса, отвечает малым значениям числа Пекле и справедливо лишь при малых начальных пересыщениях.

Работа поддержана РНФ (грант № 15-19-10025).

При рассмотрении потоков пузырьковой жидкости полидисперсность может играть важную роль. Это связано с различием условия образования пузырей и их взаимодействия с несущей фазой.

Представленная работа является продолжением серии исследований, посвященных изучению динамики пузырьков в поле силы тяжести (см., например, [1-2]), а также дальнейшим развитием полидисперсного подхода к описанию таких течений [3]. Исследования, как и в предыдущих работах, проводятся при помощи методов численного моделирования.

Математическая модель основана на континуальном эйлерово-эйлеровском подходе к описанию течений дисперсных сред. В рамках выбранного подхода каждая фаза рассматривается как сплошная среда, что позволяет использовать известные уравнения сохранения для всех фаз. Взаимодействие между фазами учитывается при помощи объемных источников/стоков в уравнениях переноса. В работе [3] представлено детальное описание исходной модели.

Для учета полидисперсности пузырьковой фазы используется модель MUSIG, в рамках которой используется кусочно-постоянная функция распределения пузырей по размерам [4] и вводятся k отдельных дисперсных сред (классов). Для каждого класса формулируется отдельная система уравнений сохранения, переход пузырей из одного класса в другой в рамках равновесного приближения осуществляется за счет изменения внешних условий несущей фазы. Пузыри в рамках каждого класса при изменении окружающего давления способны изменять свой размер согласно уравнению состояния газа внутри пузыря.

Численный алгоритм решения модельных уравнений основан на методе конечных объемов и неструктурированных сетках. Расчет полей давления и скоростей фаз реализован при помощи алгоритма SIMPLE, модифицированного для многофазных полидисперсных потоков. Второй порядок точности по пространству обеспечен TVD схемами дискретизации конвективных потоков, итерационный процесс реализован при помощи метода установления по псевдовремени. Корректирующие поправки введены в схемы вычисления градиента для устранения влияния скошенности сетки.

Исследования эволюции распределения пузырей по размерам в результате их движения в потоке несущей фазы проводились для двух вариантов: восходящее течение в пузырьковой колонне, вызванное влиянием силы плавучести на пузыри [5], и нисходящее течение в круглой трубе [6], с заданным расходом для несущей и дисперсной фазы и учетом силы тяжести.

Для случая восходящего течения приведено распределение пузырей по размерам для одного из расчетных вариантов ($k = 7$) в трех точках (см. Рис. 1). Точки А и В расположены на оси симметрии кругового аэратора (одинаковые координаты X и Y), установленного на дно пузырьковой колонны, точка А отстоит на 0.05 м от аэратора по Z , В — на 1.45 м (0.05 м от свободной поверхности). Точка С расположена на высоте 1.45 м по Z и отстоит от оси симметрии аэратора по X на 0.2 м. Как видно из распределения, относительная доля малых пузырей снижается по мере приближения к свободной поверхности на оси (В), но увеличивается на периферии (С), что связано с большим влиянием на них силы трения, поперечной силы и силы, отражающей влияние турбулентной дисперсии. В то же время большие пузыри мало отклоняются от вертикали, в результате их относительная концентрация увеличивается на оси, но значительно падает на периферии для самых больших пузырей (радиусом более 5 мм).

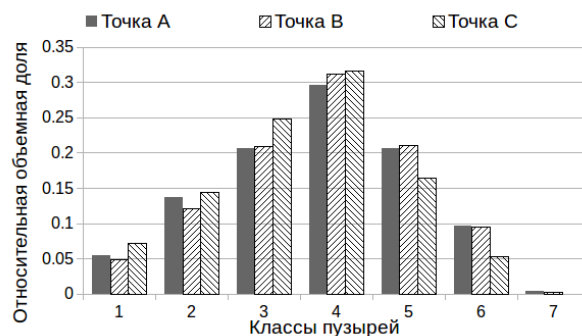


Рис 1: Распределение пузырей по размеру для 7 классов для случая восходящего течения в трех точках: одна вблизи аэратора и две вблизи свободной поверхности. Размеры пузырей: от 0.4 мм до 6.1 мм.

1. A. Chernyshev, A. Schmidt, Bubble column dynamics with bubble induced turbulence and dispersion // AIP Conf. Proc., 2013, V. 1558, P. 1071-1074.
2. А.С. Чернышев, А.А. Шмидт, Использование эйлерово-эйлеровского подхода для моделирования турбулентных течений пузырьковых сред // Письма в ЖТФ, 2013, Т. 39(12), С. 17-24.
3. A S Chernyshev and A A Schmidt, Numerical modeling of gravity driven bubble flows with account of polydispersion // Journal of Physics: Conference Series, 2016, V. 754, N. 3, 032005
4. Eckhard Krepper, Dirk Lucas, Thomas Frank, Horst-Michael Prasser, Phil J. Zwart, The inhomogeneous MUSIG model for the simulation of polydispersed flows // Nuclear Engineering and Design, 2008, Vol. 238, P. 1690–1702.
5. A. Sokolichin, G. Eigenberger, Applicability of the standard k-ε turbulence model to the dynamic simulation of bubble columns: Part I. // Chemical Engineering Science, 1999, V. 54, P. 2273-2284.
6. M. Ishii, S.S. Paranjape, S. Kim, X. Sun, Interfacial structures and interfacial area transport in downward two-phase bubbly flow // Int. J. Mult. Flow, 2004, V. 30, P. 779–801

ПРИБЛИЖЕНИЕ МЕЛКОЙ ВОДЫ В СЛОИСТЫХ СДВИГОВЫХ ТЕЧЕНИЯХ НЕОДНОРОДНОЙ ЖИДКОСТИ С МАССООБМЕНОМ

Гаврилюк С.Л.¹, Ляпидевский В.Ю.^{2,3}, Чесноков А.А.^{2,3}

¹ Университет Экс-Марсель, Марсель

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

³ Новосибирский государственный университет

E-mail: chesnokov@hydro.nsc.ru

Предложен метод построения математических моделей распространения нелинейных длинноволновых возмущений в неоднородной жидкости на основе применения теории слоистой мелкой воды с турбулентным перемешиванием между слоями [1, 2]. С использованием данного подхода выведены и верифицированы новые одномерные гиперболические и дисперсионные модели описывающие распространение и обрушение волн. Построение моделей основано на двухслойном представлении течения. Нижний слой жидкости считается потенциальным, однородным и описывается уравнениями Сен-Венана или Грина–Нагди (гиперболическая [1] и дисперсионная [2] модель, соответственно). Течение в вихревом верхнем слое моделируется осредненными уравнениями для толщины прослойки, средней скорости и турбулентной энергии. При наличии стратификации по плотности в верхнем слое, что связано с наличием проникающих в жидкость пузырьков при обрушении волн, добавляется еще одно уравнение для средней плотности в верхнем слое. Между слоями предполагается наличие массообмена пропорционального величине, характеризующей турбулентность верхнего слоя. Обоснование этой гипотезы дано [3]. Модель включает две эмпирические постоянные, отвечающие за массообмен между слоями и диссипацию энергии. Однако характерные значения этих параметров известны и качественные результаты моделирования не меняются при слабой вариации эмпирических постоянных. Используемая для моделирования схема течения представлена на рис. 1.

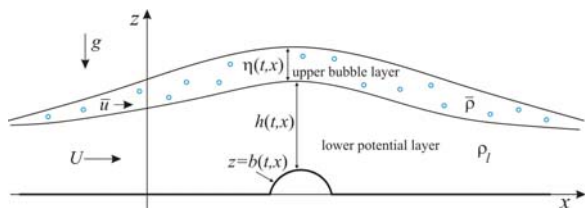


Рис. 1. Двухслойная схема течения.

Предложенные уравнения движения в случае однородной жидкости использованы для моделирования волн Фавра (формирование волнового или монотонного бора в результате гидроудара). Установлено, что в рамках двухслойной дисперсионной модели однородной жидкости описывается переход от волнового бора к монотонному гидравлическому прыжку при увеличении числа Фруда набегающего потока. Выполнено сравнение с экспериментами [4], которые показали совпадение по амплитуде головной волны для различных чисел Фруда. С использованием этой же модели получено совпадение описания эволюции

профиля уединенной волны при выходе на пологий берег с экспериментальными данными [5]. Формулировка модели, детали ее вывода и графические результаты сравнения с цитированными экспериментальными работами приведены в [2].

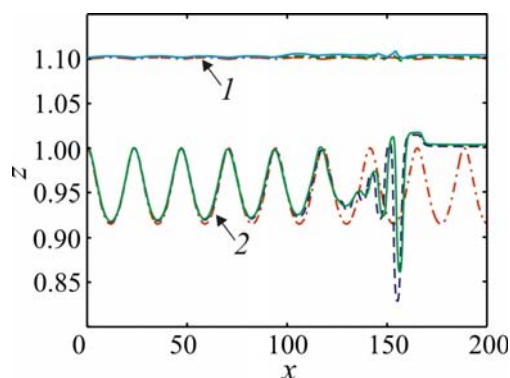


Рис. 2. Формирование периодического режима: 1 – свободная поверхность; 2 – граница раздела слоев. Сплошные линии – нестационарная дисперсионная модель; пунктир – гиперболическая модель; штрих-пунктир – стационарное решение.

Уравнения движения обобщены на случай стратифицированного (пузырькового) верхнего слоя жидкости. Проведено численное моделирование формирования периодических структур из начального равномерного двухслойного потока (рис. 2). Скорость приповерхностного слоя, насыщенного газовыми пузырьками, немного выше скорости нижнего однородного слоя жидкости. В процессе эволюции течения на границе раздела слоев возникают периодические волны. Полученные результаты качественно совпадают с измерениями амплитуды внутренних волн в шельфовой зоне океана [6].

1. Ляпидевский В.Ю., Чесноков А.А. Слой смешения под свободной поверхностью // ПМТФ. 2014. Т. 55. № 2. С. 127–140.
2. Gavriluk S.L., Liapidevskii V.Yu., Chesnokov A.A. Spilling breakers in shallow water: applications to Favre waves and to the shoaling and breaking of solitary waves // J. Fluid Mech. 2016. V. 808. P. 441–468.
3. Ляпидевский В.Ю., Тешуков В.М. Математические модели распространения длинных волн в неоднородной жидкости. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 420 с.
4. Treske A. Undular bores (Favre-waves) in open channels: experimental studies // J. Hydraulic Res. 1994. V. 32. P. 355–370.
5. Hsiao S.-C., Hsu T.-W., Lin T.-C., Chang Y.-H. On the evolution and run-up of breaking solitary waves on a mild sloping beach // Coast. Eng. V. 55. P. 975–988.
6. Nash J.D., Moum J.N. River plumes as a source of large-amplitude internal waves in the coastal ocean // Nature. 2005. V. 437. P. 400–403.

Работа поддержана РНФ (грант № 15-11-20013).

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ МИШЕНЕЙ УЛЬТРАКОРОТКИМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Шепелев В.В.¹, Фортова С.В.¹, Иногамов Н.А.¹

¹ Институт автоматизации проектирования РАН, Москва

² Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау, Москва

E-mail: vadim.aries@gmail.com

В последние десятилетия не теряет актуальности проблема исследования механизмов формирования нанорельефа при лазерном облучении. Задача о пространственно локализованном лазерном воздействии на металлическую пленку важна для различных приложений в микроэлектронике, биомедицине, наноплазмонике и многих других областях фундаментального и прикладного характера, связанных с высокоточной обработкой поверхностей металлов.

В основе настоящей работы лежат результаты экспериментов по фемтосекундному лазерному облучению тонкопленочных мишеней. В натурном эксперименте исследуется движение и рельеф границ металлической пленки, напыленной на толстую стеклянную подложку. Размеры сквозных отверстий, образовавшихся при облучении тонкой золотой пленки, напыленной на стеклянную подложку, составляют единицы мкм и на порядок превосходят ожидаемый размер порядка диаметра пучка. Отверстия начинают образовываться на тыльной стороне в процессе деляминации пленки.

В двумерной постановке представлена упрощенная однотемпературная гидродинамическая модель, основанная на двухтемпературной модели Анисимова, Капелиовича и Перельмана [1] и нелинейных уравнениях динамики идеальной жидкости Эйлера. Модель учитывает поглощение излучения металлической пленкой, образование и распространение волны сжатия в металле и стекле, возникающей вследствие неоднородного нагрева поверхности пленки ультракоротким лазерным импульсом, а также ее последующая сферизация и взаимодействие с поверх-

ностью пленки, приводящее к отрыву пленки от стеклянной подложки.

Вычислительные эксперименты проведены с использованием программного пакета TurbulenceProblemSolver (TPS) [2], предназначенного для численного решения задач, описываемых системой уравнений в частных производных гиперболического типа. Пакет реализует обобщенный подход к построению вычислительных программ и предоставляет пользователю численные методы и программные блоки, содержащие специфические для задачи начальные, граничные условия и массовые силы. TPS является расширяемым программным продуктом и позволяет пользователю внедрять свои разработки в программный код. Использование пакета позволяет сократить срок разработки новых программных приложений и задействовать в расчетах многопроцессорные вычислительные системы.

1. С.И. Анисимов, Б.Л. Капелиович, Т.Л. Перельман, Электронная эмиссия с поверхности металлов под действием ультракоротких лазерных импульсов, ЖЭТФ, 66 (2), 776-779 (1974).
2. С. В. Фортова, Л. М. Крагинский, А. В. Чикиткин, Е. И. Опарина, Программный пакет для решения гиперболических систем уравнений, Мат. моделирование, т. 25, № 5, стр. 123-135 (2013).

Вычислительная часть работы выполнена В.В. Шепелевым и С.В. Фортовой в ИАП РАН при поддержке Российского Научного Фонда (Соглашение №17-11-01293). Теоретическая часть выполнена Н.А. Иногамовым в ИТФ им. Ландау РАН, при поддержке Российского Научного Фонда (Соглашение №14-19-01599).

ТРЕХМЕРНАЯ СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЯ В БЛИЖНЕМ ПОЛЕ КВАЗИ-ДВУМЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУИ Шестаков М.В.^{1,2}, Токарев М.П.^{1,2}, Маркович Д.М.^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск² Новосибирский государственный университетE-mail: mvsh@itp.nsc.ru

Интерес к исследованию струйных течений, развивающихся в ограниченном пространстве между двумя плоскопараллельными пластинами, обусловлен широким спектром технологических устройств энергетического оборудования, в котором реализуются данный тип течения. В энергетических установках важную роль играют процессы теплообмена, которые происходят на масштабах меньших толщины слоя жидкости потока. В работах [1-3] по исследованию ограниченной затопленной струи было показано, что вблизи ограничивающих стенок образуются вторичные течения. В работе [3] была предложена модель формирования вторичных течений, основанная на переориентации вихревых трубок вблизи стенки. Однако экспериментальные методы, использованные в этих работах, основанные на одноточечных или полевых методах измерения скорости, не позволяют получить информацию о процессе образования вторичных течений, который является существенно трехмерным.

В данной работе применяется метод, основанный на малоракурсной оптической томографии Tomographic PIV (Tomo PIV) [4], который в настоящее время является одним из перспективных методов измерения всех трех компонент скорости в объеме потока. Исследования проводились в ближнем поле квази-двумерной турбулентной струи в широком диапазоне чисел Рейнольдса. Исследуемое течение формировалось при истечении струи из сопла прямоугольного сечения $2,5h \times h$ в узкий канал, образованный двумя плоскопараллельными пластинами, глубиной $h = 4$ мм. В экспериментах использовалась измерительная система «ПОЛИС», состоящая из 4 камер Photron SA5, скоростного импульсного Nd:YAG лазера Photonix DM-532-150, синхронизатора и управляющего компьютера с программным обеспечением «ActualFlow». Измерения проводились в области с размерами $8h \times 10h \times h$, расположенной на выходе из сопла. Для повышения точности томографической реконструкции объемных распределений частиц корректировалась модель камер при помощи самокалибровки [5], проводимой по изображениям частиц, полученных в результате эксперимента. Реконструкция распределения частиц в объеме проводилась с использованием SMART алгоритма [6]. Восстановленный объем составил $506 \times 659 \times 62$ вокселей. При расчете скорости было выполнено четыре итерации, две итерации с разрешением $64 \times 64 \times 32$ вокселя и две итерации с разрешением $32 \times 32 \times 16$ вокселя. Последняя итерация выполнялась с перекрытием 75%, в результате пространственное разрешение для распределения скорости составило $0,52 \times 0,52 \times 0,26$ мм³ на вектор.

На рисунке 1 представлено осредненное распределение скорости в объеме потока для числа Re 20 000.

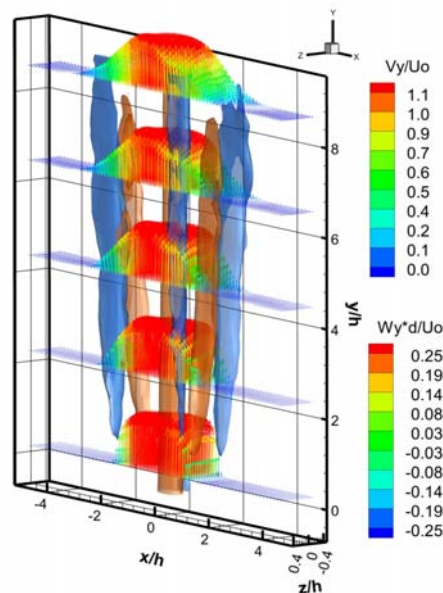


Рис. 1. Трехмерное векторное поле средней скорости и изоповерхности продольной компоненты завихренности

В работе продемонстрированы основные шаги применения и реализации Томо PIV метода для измерения и расчета трехкомпонентных распределений скорости в объеме потока. Представлены трехкомпонентные распределения мгновенной и осреднённой скорости для широкого диапазона чисел Re от 2 000 до 20 000. На основании полученных экспериментальных данных показано, что во всем диапазоне чисел Re в ближней зоне квази-двумерной турбулентной струи формируются вторичные течения. Вторичные течения являются результатом формирования в потоке продольных вихревых структур, которые в свою очередь генерируются в результате взаимодействия вихревых структур сдвигового слоя со стенками канала.

1. Foss J.F., Jones J.B. Secondary flow effects in a bounded rectangular jet // Journal of Fluids Engineering. 1968. V. 90, P. 241–248.
2. Dracos T., Giger M., Jirka. G. Plane turbulent jets in a bounded fluid layer // Journal of Fluid Mechanics. 1992. V. 241, P. 587–614.
3. Holdeman J., Foss J.F. The initiation, development, and decay of secondary flow in a bounded jet // Journal of Fluids Engineering. 1975. V. 97, P. 342–352.
4. Scarano F. Tomographic PIV: principles and practice // Measurement Science and Technology. 2013. V. 24, P. 012001.
5. Wieneke B. Volume self-calibration for 3D particle image velocimetry // Experiments in Fluids. 2008. V. 45, P. 549–456.
6. Bilsky A.V., Lozhkin V.A., Markovich D.M., Tokarev M.P. A maximum entropy reconstruction technique for tomographic particle image velocimetry // Measurement Science and Technology. 2013. V. 24, P. 045301.

Работа поддержана РФФ (грант № 14-19-01685)

Анисимов М.П.^{1,3}, Терехов В.И.², Шишкин Н.Е.^{1,2}¹ Новосибирский государственный технический университет² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск³ Конструкторско-технологический институт научного приборостроения
СО РАН, Новосибирск,E-mail: shishkin@itp.nsc.ru

Интерес к испарению жидких пленок и капель содержащих поверхностно-активное вещество (ПАВ), вызван возможностью управлять силами поверхностного натяжения на межфазовой границе и, таким образом, воздействовать на тепломассообмен. Ранее, в многочисленных и систематических исследованиях авторов было показано, что при испарении капель различных жидкостей температура на поверхности неравномерна. Неравномерность температуры практически не зависела от скорости обтекающей среды. Авторы данной работы не нашли в литературе детального объяснения причин образования неоднородностей температуры на поверхности капли.

Термографические измерения показали, что неоднородность температуры на поверхности капли вызывается флуктуационными выбросами пара (вскипанием жидкости) в локальных центрах. В данной работе было предложен алгоритм эмпирического определения скоростей возникновения паровых зародышей в подвешенной испаряющейся капле. Число таких центров и динамика их появления от времени регистрировались с помощью специальной программы, позволяющей сканировать по уровню температуры тепловизионные снимки.

Проведено экспериментальное исследование испарения капель воды, содержащие поверхностно-активное вещество (ПАВ) - додецилсульфат натрия. Начальное массовое содержание ПАВ составляло ~ 0,15%. Капли чистой воды или с добавками ПАВ испарялись в потоке сухого воздуха в диапазоне температур $T_0 = \sim (20 \div 90)^\circ\text{C}$ и скорости потока $V_0 \sim 2 \div 5$ м/с. Начальный диаметр капель был равен $d_0 \sim 2$ мм, при этом число Рейнольдса составляло $Re = 500 \div 2000$. В экспериментах фиксировалась с помощью термографической камеры Thermo Tracer TH7102MV зависимость от времени температуры поверхности и размер капель.

Скорости испарения и температура поверхности капли, регистрировались с помощью инфракрасного микроскопа. Показано, что неоднородность температуры на поверхности капли вызывается флуктуационными выбросами газа в локальных центрах кипения жидкости на поверхности капель. Добавление поверхностно активного вещества в базовую жидкость (вода) оказывает существенное влияние на кинетику зародышеобразования пара и на характер изменения от времени температуры на поверхности испаряющихся капель.

Для расчета скорости нуклеации использовалась формула: $\omega = N \cdot k / (\tau V)$; где ω – скорость нуклеации

(число центров вскипания в объеме жидкости величиной 1 см^3 , за время 1 сек). Число событий вскипания (N) определялось на выделенном участке кадра, который экспонировался в интервале времени $\tau = 0,25$ сек, k – фактор формы, позволяющий оценить число центров вскипания в расчете на всю поверхность капли. Здесь τ – время экспозиции кадра; V – объем метастабильного слоя на капле, т.е. слоя вскипания. Он равен площади поверхности шара, умноженной на толщину слоя вскипания (мы приближенно приняли толщину метастабильного слоя жидкости, равной двум пикселям на тепловизионном изображении).

Результаты измерений скоростей зародышеобразования при вскипании жидкости на поверхности капли приведены на рис. 1 (скорость струи воздуха – $3 \div 4$ м/с).

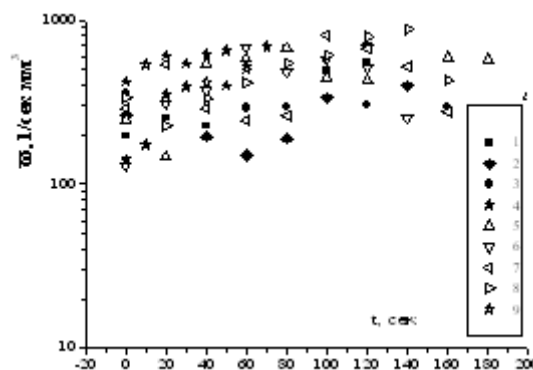


Рис. 1. Скорости зародышеобразования центров парообразования на поверхности капель: точки (1 - 4) – чистая вода, а точки (5 - 9) – содержащие ПАВ. Температура струи воздуха – $19,8^\circ\text{C}$, а для опытов 4, 9 – 80°C .

Обнаружено, что появление центров парообразования слабо зависит от исследованных параметров и определяется внутренними условиями в каплях: температурой, давлением, физическими свойствами базовой жидкости. Добавка ПАВ усиливает поверхностное натяжение, что и приводит к сдерживанию массообмена и повышению средней температуры в капле.

Авторы выражают признательность РАН за финансовую поддержку в рамках Программы ОЭМПУ РАН, гранта Президента РАН по поддержке ведущих научных школ РФ – проект НШ-8780-2016.8 и гранта МОиН России в рамках контракта № 14.Z50.31.0041 от 13 февраля 2017 года.

Фокусировка волн может быть рассмотрена как возможный сценарий локальной концентрации энергии и последующего обрушения волн. В лаборатории фокусировку внутренних, инерционных и инерционно – гравитационных волн можно смоделировать колебаниями тора в однородно – стратифицированной или вращающейся жидкости. Для внутренних волн, генерируемых горизонтальными колебаниями тора, было показано, что при числах Стокса порядка $O(10^2)$ амплитуда в зоне фокусировки существенно увеличивается [1]. Увеличение амплитуды колебаний тора ведет к локальному обрушению волн в таких зонах. В случае инерционных волн, генерируемых вертикальными колебаниями тора во вращающейся жидкости, в зоне фокусировки возникает турбулентность [2].

В настоящей работе представлены экспериментальные данные, полученные на платформе Coriolis 2 (г. Гренобль, Франция), имеющей диаметр 13.5 м. В качестве генератора волн использовался тор с радиусом сечения $a = 15$ см и главным радиусом $b = 75$ см, горизонтально колеблющийся в однородно стратифицированной и/или вращающейся жидкости. Постановка задачи позволила сравнить структуру и свойства внутренних, инерционно – гравитационных и инерционных волн. Угол наклона волновых пучков к вертикали был фиксированным для всех трех видов волн. Визуализация волн осуществлялась с помощью PIV техники.

Условия проведения экспериментов позволили исследовать задачу в достаточно крупном масштабе при значении числа Стокса $St = 5000$. В этом случае эффекты молекулярной вязкости слабы, и волновой пучок бимодален: в его поперечном сечении имеются два максимума амплитуды колебаний жидких частиц. Таким образом, в зоне фокусировки формируются четыре локальных максимума амплитуды.

В отличие от результатов, полученных при числах Стокса порядка $O(10^2)$, безразмерная амплитуда волн в фокусной зоне уменьшается с увеличением безразмерной амплитуды колебаний A/a . Спектральный анализ показал возникновение локализованных, экспоненциально затухающих высших гармоник в зоне фокусировки и вблизи тора. Формирование ненулевой вертикальной завихренности, принимающей форму диполя, показывает наличие нелинейных эффектов в фокусной зоне. Во вращающейся стратифицированной жидкости, то есть в случае инерционно – гравитационных волн, диполь преобразуется в Инъ-Ян структуру, где отрицательная и положительная компоненты завихренности вращаются друг вокруг друга. Поля внутренних и инерционных волн схожи по своей структуре, но в случае последних, зона максимума горизонтальной компоненты завихренности

растянута вдоль колонны Тейлора, формирующейся в центре вращающейся платформы.

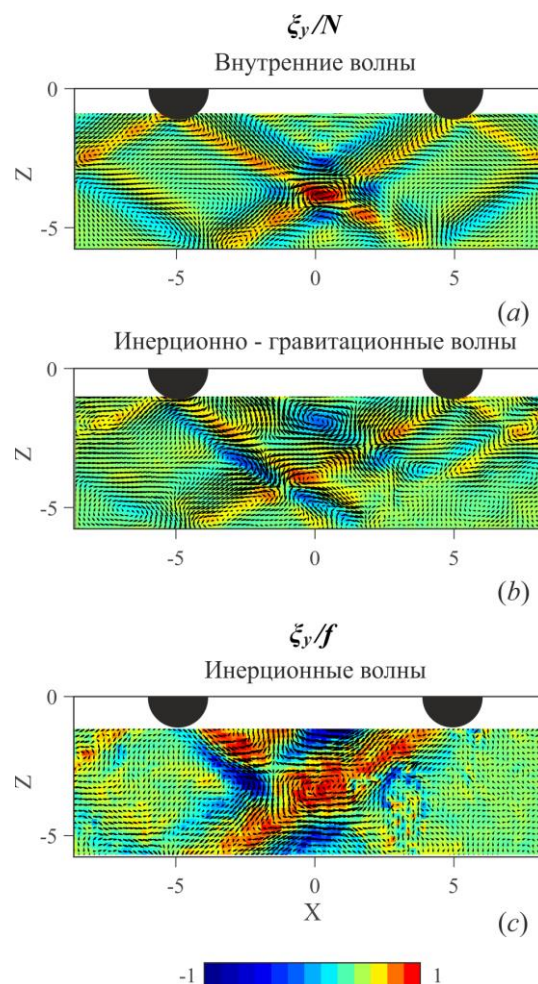


Рис. 1. Горизонтальная компонента завихренности $\xi_y / N(\xi_y / f)$ в вертикальной плоскости, параллельной колебаниям тора. Амплитуда колебания $A/a = 0.17$

Экспериментальные данные для внутренних волн были сопоставлены с полной трехмерной теорией. Показано, что теория дает завышенную оценку для амплитуды волны. Это, вероятно, является следствием наличия вязкого турбулентного пограничного слоя, не предусмотренного линейной теорией. Перерасчет теории для жидкости с искусственно завышенной (турбулентной) вязкостью дает амплитуду волны, сопоставимую с экспериментальными данными.

1. Ermanyuk E.V., Shmakova N.D & Flor J.-B. Internal wave focusing by a horizontally oscillating torus// J. Fluid Mech. 2017. № 813. pp. 695 – 715.
2. Duran-Matute M., Flor J.-B., Godefert F.S. & Jause-Labert C. Turbulence and columnar vortex formation through inertial-wave focusing// Phys. Rev. E. 2013. № 87(4).

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ДАННЫХ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ В АЗОВСКОМ МОРЕ

Шульга Т.Я.¹¹ ФБУН «Морской гидрофизический институт РАН», г. СевастопольE-mail: shulgaty@mail.ru

В работе обсуждаются методы совместного использования информации, полученной методами дистанционного зондирования морской поверхности из космоса и модельных решений. Проводится анализ их согласованности, позволяющий выявлять негативные изменения состояния морской среды, прогнозировать их возникновение и последствия антропогенных воздействий. На основе разработанных новых модельных алгоритмов обобщаются результаты численного моделирования и данных спутниковых наблюдений о состоянии вод акватории Азовского моря за период с 2013 по 2014 гг.

В численных исследованиях использовалась версия трехмерной нелинейной гидродинамической модели *POM (Princeton Ocean Model)* [1], адаптированной к условиям Азовского бассейна примененная также для численного анализа эволюции загрязнений. Математическая модель основывается на уравнениях турбулентного движения вязкой жидкости в приближении гидростатики. Пространственное разрешение сетки модели по горизонтали – $1,4 \times 1,4$ км, число расчетных уровней по вертикали – одиннадцать. Используются различные временные шаги для нахождения осредненных двухмерных составляющих скорости и уровня моря (18 с), и для вычисления отклонений от найденных средних и вертикальной составляющей скорости (3 мин). Карта батиметрии и конфигурации береговой линии Азовского моря построена на основе оцифровки карт Гидрографической службы и интерполирована на расчетную сетку. Моделирование распространения примеси выполнено на основании решения уравнения переноса и диффузии, для которого на свободной поверхности и в придонном слое к динамическим граничным условиям добавляются условия отсутствия потоков примеси через свободную поверхность, боковые стенки и дно бассейна [2].

В работе использованы спутниковые данные за 2013 и 2014 гг. второго уровня прибора *MODIS* со спутника *Aqua* и прибора *SeaWiFS* со спутника *SeaStar* с браковкой данных по критериям, которые описаны в [3]. Исходные данные для обоих приборов имеют километровое пространственное разрешение. В верхнем слое моря по спутниковым данным были рассчитаны следующие параметры: отношение нормализованной яркости света $L_{WN}(\lambda)$, выходящего изпод поверхности воды, в двух спектральных каналах 531 нм и 488 нм (*index34*), и коэффициент обратного рассеяния света частицами взвеси на длине волны 555 нм ($b_{bp}(555)$), позволяющий наблюдать за особенностями рассеяния света. Эти данные определяют наличие взвеси (например, минеральной взвеси, связанной с речными выносами или подъёмом со дна в

результате сильного ветра), и также взвеси биологического происхождения (например, цветение кокколитофорид).

Моделирование сценариев распространения загрязняющей примеси (2013 – 2014 гг.) проведено с использованием метеорологических данных системы атмосферного моделирования *SKIRON* [4]. Эти данные с шагом $0,1^\circ$ интерполированы на расчетную сетку бассейна Азовского моря с указанным горизонтальным разрешением. Серии численных экспериментов проводились для начальных концентраций загрязняющей примеси, соответствующих данным спутниковых наблюдений, содержащих наиболее полную информацию о взвеси различного происхождения. Анализ глубинной и поверхностной эволюции загрязнений выполнен на основании результатов расчетов, проведенных с использованием атмосферных полей модели *SKIRON*. С целью анализа согласованности данных спутниковых наблюдений и результатов моделирования в узлах сетки проводится сравнение концентрации загрязняющей примеси в поверхностном слое моря при условии полной информативности спутниковых снимков.

Совместный анализ результатов численного моделирования и спутниковых изображений представляется наиболее эффективным, так как обеспечивает более полную информацию о направлениях переноса, размерах и концентрации областей загрязнений, в моменты отсутствия изображений не различимых на оптике. И также позволяет сравнивать результаты расчетов с оперативной обстановкой, выявленной по спутниковым изображениям, приводящие к обоснованным выводам при составлении прогноза последствий распространения загрязнений.

1. Blumberg A.F., Mellor G.L. A description of three dimensional coastal ocean circulation model // Three-Dimensional Coastal Ocean Models. / Ed. N. Heaps. Washington D. C., American Geophysical Union. 1987. V. 4. P. 1–16.
2. Иванов В.А., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я. Исследование влияния переменного по пространству и времени ветра на течения, сгонно-нагонные процессы и распространение примеси в Азовском море // Метеорология и гидрология. 2012. № 8. С. 69–79.
3. Suslin V., Churilova T. A regional algorithm for separating light absorption by chlorophyll-*a* and coloured detrital matter in the Black Sea, using 480–560 nm bands from ocean colour scanners // International Journal of Remote Sensing. 2016. V. 37, No. 18. P. 4380–4400.
4. Kallos G., Nickovic S., Papadopoulos A. et al. The regional weather forecasting system SKIRON: An overview // Proceedings of the symposium on regional weather prediction on parallel computer environments. 1997. No. 15. P. 17.

Работа выполнена в рамках государственного задания (0827-2014-0010).

ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ЗАКРУЧЕННОГО ТЕЧЕНИЯ В ДВУХСТУПЕНЧАТОМ ГОРЕЛОЧНОМ УСТРОЙСТВЕ

Юсупов Р.Р.^{1,2}, Красинский Д.В.¹, Шторк С.И.¹

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

² Новосибирский государственный университет

E-mail: romansemsk@yandex.ru

Одной из интересных задач в области закрученных течений является изучение характеристик поведения взаимодействующих закрученных потоков. Необходимость подобных исследований вызвана, в частности, возможностями применения встречных закрученных потоков в устройствах для гашения энергии [1] и в вихревых камерах сгорания [2]. Чтобы оптимизировать процесс смешения потоков в данных устройствах, необходимо понимание структуры потока и механизмов смешения.

Целью данной работы является экспериментальное и численное исследование аэродинамической структуры закрученного течения в осесимметричной изотермической модели вихревой камеры сгорания (Рис. 1). В данном рабочем участке реализована подача потока жидкости при помощи двух последовательно соединённых тангенциальных завихрителей. В зависимости от способа подачи на второй завихритель может реализоваться как созакрутка, так и противокрутка двух потоков. В ходе работы было исследовано влияние способа закрутки потока на результирующую структуру течения. Проведена визуализация вихревого потока как при созакрутке, так и при противокрутке потоков. С использованием измерительной ЛДА системы получены осреднённые по времени профили осевой и тангенциальной компонент скорости.

Опыты показали, что в случае созакрутки распределение результирующего течения характеризуется сильной неравномерностью, именно, основной поток жидкости имеет место вдоль боковой стенки, а вдоль оси камеры формируется обширная застойная область. Напротив, в случае противокрутки потоков происходит быстрое смешение потоков первой и второй ступеней, в результате чего реализуется равномерное распределение потока по сечению камеры. Таким образом, режим с противокруткой является более предпочтительным для использования в горелочном устройстве.

Численное моделирование 3D изотермического турбулентного течения в исследуемой модели вихревой камеры выполнено для режима противокрутки с использованием дифференциальной модели переноса рейнольдсовых напряжений (DRSM) в нестационарной постановке, с шагом по времени 2 мс. Заданные в моделировании условия соответствовали экспериментам. Использовалась расчетная сетка, состоящая из ~1.45 млн. полиэдрических ячеек, для проведения расчетов применялся CFD-пакет FLUENT. В результате расчетов получены ансамбли мгновенных реализаций поля течения, а также поля осредненных и пульсационных характеристик при осреднении на периоде 6.3 с. С применением известного Q -критерия идентификации вихрей [3] визуализирована эволю-

ция крупномасштабных вихревых структур закрученного потока в вихревой камере (см. рис. 2), свидетельствующая о существовании в вихревой камере двух вихревых нитей спиральной формы, которые также наблюдались в эксперименте. Выявлен периодический характер динамики этих вихревых структур – так, из анализа спектров установлена характерная частота $f_p=3.945$ Гц максимальных пульсаций давления в вихревой камере.

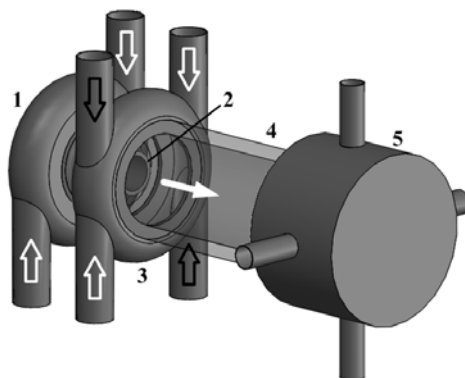


Рис. 1. Схема изотермической модели вихревой камеры: 1 и 3 – тангенциальные завихрители, 2 – профилированное сопло, 4 – область внезапного расширения, 5 – выходная секция с отводами и системой лопаток.

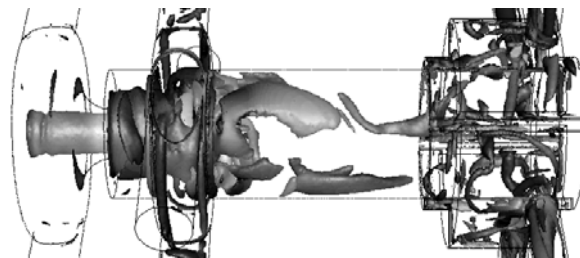


Рис. 2. Изоповерхности Q -критерия ($Q=750 \text{ с}^{-2}$) в модели вихревой камеры в момент времени $t=22.8 \text{ с}$, CFD-расчет.

1. Волшаник В.В., Орехов Г.В. Области применения взаимодействующих закрученных потоков жидкостей и газов // Вестник МГСУ. 2015. № 7. С. 87-104.
2. Sung Y., Choi G. Non-intrusive optical diagnostics of co- and counter-swirling flames in a dual swirl pulverized coal combustion burner // Fuel. 2016. V. 174. P. 76–88.
3. Dubief Y., Delcayre F. On coherent-vortex identification in turbulence // Journal of Turbulence. 2000. V. 1, No. 11.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по Соглашению о субсидии №14.607.21.0150.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ИОННАЯ ЖИДКОСТЬ – ВОДА В МИКРОКАНАЛАХ Т-ТИПА С РАЗЛИЧНЫМ ОТНОШЕНИЕМ ГЛУБИНЫ К ШИРИНЕ**Ягодницына А.А.^{1,2}, Ковалев А.В.^{1,2}, Бильский А.В.^{1,2}**¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск² Новосибирский государственный университетE-mail: yagodnitsinaAA@gmail.com

В последнее время использование ионных жидкостей – солей, жидких при температуре до 100°C, в качестве замены стандартных растворителей в органических реакциях значительно выросло. Это связано с такими свойствами ионных жидкостей как низкое давление насыщенных паров, высокая растворяющая способность даже для трудно растворимых в стандартных растворителях соединений, негорючесть, а также термическая, химическая и электрохимическая стойкость. Ионные жидкости могут быть использованы в широком ряде технологических процессов: для отделения бензола от гексана, в качестве катализатора для синтеза производных сахара и т.д. Использование ионных жидкостей в качестве экстрагента в процессе переработки облучённого ядерного топлива (PUREX-процесс) может значительно повысить эффективность и безопасность отдельных этапов PUREX-процесса, и частично решить острую для атомной энергетики проблему обращения с жидкими высокоактивными отходами.

Ограничением широкого использования ионных жидкостей в технологических процессах является их относительно высокая стоимость. Для уменьшения стоимости использования ионных жидкостей в промышленных масштабах требуется значительно повысить эффективность экстракции и снизить расход реагента, что может быть достигнуто за счет применения микроканальных устройств. Фундаментальных данных, необходимых для инженерных расчётов и проектирования практически направленных устройств с использованием ионных жидкостей, на текущий момент недостаточно. Большинство существующих численных и теоретических моделей, описывающих перепады давления, устойчивость режимов течения, массообмен и т.д., либо применимы в узком диапазоне параметров, либо требуют экспериментального подтверждения. В научной литературе уже существует несколько работ в области исследования течений несмешивающихся жидкостей в микроканалах в случае, когда одна из фаз является ионной жидкостью. В работе [1] исследована структура потока в приборах воды при приборном режиме течения ионная жидкость – вода, было показано наличие областей циркуляции в приборах, построена зависимость величины циркуляции от скорости и длины приборов. В работе [2] были построены карты режимов для микроканалов из трёх различных материалов, показано значительное влияние фазы, первой проникшей в канал, на режим течения и перепад давления в канале. В работе [3] исследованы массоперенос и гидродинамика течения в случае реакции экстракции с преобладанием ионообменного механизма

– выделение ионов диоксида урана из азотной кислоты, что соответствует реальному этапу в PUREX-процессе. Как видно из небольшого ряда работ, имеющих по данной тематике, многие аспекты течений несмешивающихся жидкостей в микроканалах в случае, когда одной из фаз является ионная жидкость, практически не изучены. В том числе не раскрыт вопрос влияния отношения глубины к ширине микроканала на режимы течения и интенсивность массопереноса, что является ключевым при проектировании микрореакторов.

В настоящей работе экспериментально исследовано течение ионная жидкость – вода в микроканале Т-типа с различным отношением глубины к ширине для построения фундаментальных основ перспективных технологий с использованием ионных жидкостей. С помощью скоростной видеорегистрации определены основные режимы течения ионная жидкость-вода, определены границы существования каждого режима, построена карта режимов течения. В качестве рабочих жидкостей использованы ионная жидкость [C4mim] [NTF2] (1,42 г/см³, вязкость 0,029 Па*с, поверхностное натяжение 0,032 Н/м) и дистиллированная вода. Визуализация проводилась в микроканалах Т-типа с гидравлическим диаметром 160 мкм и отношением глубины к ширине 1:2 и 1:4.

Полученные экспериментальные данные имеют как практическое применение для проектирования и оптимизации микрореакторов с использованием ионных жидкостей для широкого круга технологических процессов, так и фундаментальное, могут использоваться для верификации численных методов расчета течения несмешивающихся жидкостей в микроканалах.

1. V. Dore, D. Tsaoulidis, and P. Angeli, "Mixing patterns in water plugs during water/ionic liquid segmented flow in microchannels," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 80, pp. 334–341, 2012.
2. D. Tsaoulidis, V. Dore, P. Angeli, N. V. Plechkova, and K. R. Seddon, "Flow patterns and pressure drop of ionic liquid-water two-phase flows in microchannels," *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 54, pp. 1–10, 2013.
3. D. Tsaoulidis and P. Angeli, "Effect of channel size on mass transfer during liquid-liquid plug flow in small scale extractors," *Chem. Eng. J.*, vol. 262, pp. 785–793, 2015.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №16-19-10519).

ВЛИЯНИЕ НЕКОТОРЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ И ЗАБОЛЕВАНИЙ НА СТРОЕНИЕ КРОВЕНОСНОЙ СИСТЕМЫ ГОЛОВНОГО МОЗГА МАЛЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ ЖИВОТНЫХ

Янькова Г.С.¹, Черевко А.А.¹, Паршин Д.В.¹

¹ Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

E-mail: galinayankova2703@gmail.com

Кровеносная система головного мозга является интенсивно работающей системой, снабжающей все участки мозга необходимым количеством кислорода, глюкозы и других веществ. От ее эффективности во многом зависит функционирование организма. Важной задачей является изучение влияния генетических особенностей и заболеваний на строение сосудистой сети.

В работе рассматриваются модели сосудистых сетей головного мозга двух различных генетических линий лабораторных мышей – линия с нокаутом по ФНО и контрольная линия, а также генетическая линия мышей NODSCID с сахарным диабетом I типа.

Для изучения гемодинамики необходимо иметь реальную конфигурацию сосудистой системы головного мозга. Для построения таких конфигураций успешно применяется магнитно-резонансная томография (МРТ). Сосудистые сети для нокаутной линии получены в результате обработки данных МРТ-сканирования методом варьирования наклона сканирующей плоскости [1]. Для линии мышей NODSCID был применен метод получения МРТ изображений с использованием объемной протонной радиочастотной катушки.

Для построенных конфигураций проведены гемодинамические расчеты с помощью пакета ANSYS CFX на базе компьютерного центра НГУ, был выполнен статистический анализ параметров кровотока.

На основе данных, полученных в результате статистического и численного анализа, для двух различ-

ных генетических линий лабораторных мышей показано отсутствие влияния нокаута по ФНО на морфологические и гидродинамические характеристики Виллизиева круга [2]. Проведенный статистический анализ геометрических и гидродинамических параметров моделей сосудистых сетей для мышей с сахарным диабетом I типа выявил статистически значимые различия в строении артерий, подходящих к Виллизиеву кругу.

1. Maltseva S. V., Cherevko A. A., Khe A. K., Akulov A. E., Savelov A. A., Tulupov A. A., Derevtsov E. Yu., Moshkin M. P., Chupakhin A. P. Reconstruction of complex vasculature by varying the slope of the scan plane in high-field magnetic resonance imaging // *Applied Magnetic Resonance*. 2016. V.47. P. 23 - 39
2. Cherevko A. A., Yankova G. S., Maltseva S. V., Parshin D. V., Akulov A. E., Khe A. K., Chupakhin A. P. Construction and investigation of 3D vessels net of the brain according to MRI data using the method of variation of scanning plane // *Journal of Physics: Conference Series*. 2016 V. 722. P. 012029

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №17-08-01736 и гранта Правительства Российской Федерации 14.W03.31.0002. Приобретение лабораторных животных и использование инструментальных ресурсов было обеспечено средствами государственного задания по проекту № 0324-2016-0002. Томографические исследования проводились на базе Центра генетических ресурсов лабораторных животных (RFMEFI61914X0005 и RFMEFI62114X0010).

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННОГО ТОПЛИВА НА ОСНОВЕ УГЛЯ МАРКИ Т (АЛАРДИНСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ) И ОТХОДОВ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Янковский С.А.¹, Толокольников А.А.¹, Губин В.Е.¹

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

E-mail: Jankovsky@tpu.ru

Ежегодно в РФ происходит увеличение производственных мощностей лесопромышленного комплекса, так же в болотах утилизируются тонны древесных отходов, которые могут использоваться в энергетических целях. Территория нашей страны велика и имеет огромные территории с децентрализованным энергоснабжением, а дорогостоящая транспортная составляющая поставки энергоресурсов затрагивает вопрос о целесообразности использования дешевых местных топлив, таким топливом являются отходы лесопромышленного производства. Известно [1], древесина является углерод-нейтральным топливом. Древесина сама не является высококалорийным топливом, а отходы лесопромышленного производства тем более, но применение мелкодисперсной древесины в смесевом составе с энергетическим углем, снижает объемы потребления привозного топлива, с сохранением калорийности исходного угля, с низкой зольностью как у древесины. Актуальность исследований в данном направлении значительна, и подтверждается дискуссиями в мировом научном сообществе. [1-4]

Экспериментальная часть

Подготовка исследуемых образцов проводилась в соответствии с ГОСТ 10742-71 с последующим просеиванием в соответствии с ГОСТ 3306-88. Размер частиц исследуемых порошков угля составил менее 80 мкм, опилок менее 200 мкм. [2]

Измельченные образцы угля марки Т (Алардинское месторождение), и отходы лесопромышленного производства (мелкодисперсная древесина) были проанализированы и был установлен элементный анализ каждого топлива в отдельности, с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) JEOL JCM-6000 [2]. Далее были подготовлены смесевые концентрации топлив, подготовленные образцы загружались в оцинкованный барабан планетарной мельницы Pulverisette 6 с шарообразными мелющими телами диаметром 5 мм в массовом соотношении 1:1. После загрузки и установки барабана в мельницу проводился процесс смешения в течение 7 минут при скорости вращения 500 об/мин. Проведен технический анализ полученных образцов смесевых топлив. [1-2]

Для проведения термогравиметрического анализа с использованием совмещенного ТГ-ДСК анализатора Netzsch STA 449 F3 Jupiter (Netzsch, Germany) использовались образцы смесового топлива навеской 20 мг. Продувка образцов производилась с расходами аргона 10 мл/мин воздуха 50 мл/мин. Скорость нагрева 10 К/мин и максимальная температура нагрева состава 1373 К. [4]

В результате проведенной серии экспериментов получены зависимости изменения теплоты сгорания смесового топлива от его состава.



Рис. 1. Исходная калорийность топлива.

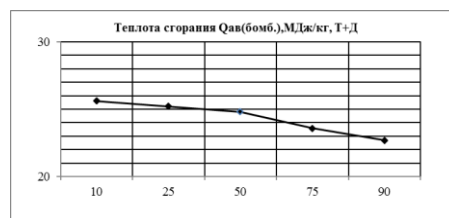


Рис. 2. Изменение калорийности композитного топлива от процентного соотношения основного топлива и отходов лесопромышленного производства.

Заключение

Проведен термогравиметрический анализ смесевых топлив с разным концентрационным составом отходов лесопромышленного производства (мелкодисперсная древесина) и угля марки Т Алардинского месторождения. Полученные данные позволяют определить влияние концентрации мелкодисперсной древесины в составе каменного угля на кинетические параметры. Выявлено, что увеличение концентрации древесины в составе топлива приводит к снижению температуры воспламенения, энергии активации и увеличению интенсификации горючих газов. Калорийность при изменении концентрации отходов лесопромышленного производства от 10% до 50% в смесевом топливе изменяется менее 1%.

Список литературы

1. Zenkov A, Yankovsky S*, Matveeva A, Lavrinenko S, Alexander G. Research of Heat Rates Effect on the Process Of Fuel-Bed Gasification Of "Balakhtinskoe", "Osinnikovskoe", "Krasnogorskoe" and "Borodinskoe" Coal Deposits // MATEC Web of Conferences 72— Les Ulis: 2015. — V. 72. P. 4
2. Yankovsky S. A. Research of Heating Rates Influence on Layer Coal Gasification of Krasnogorsky And Borodinsky Coal Deposit// MATEC Web of Conferences. — Les Ulis: 2015. — V. 37. P.4
3. Niu Z., Liu G., Yin H., Wu D., Zhou C. Investigation of mechanism and kinetics of non-isothermal low temperature pyrolysis of perhydrous bituminous coal by in-situ FTIR // Fuel. - 2016. - V.172. - P.1-10.
4. Larionov K. B. [et al.] Study of Electrophysical Intrastratal Gasification at Different Coal Heating Rate // MATEC Web of Conferences. — Les Ulis: 2015. — V. 37. P.5

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, в рамках реализации проекта №13.7644.2017/БЧ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ СКВОЗЬ УПРУГИЙ ПОРИСТЫЙ СКЕЛЕТ НА ОСНОВЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИ СОГЛАСОВАННЫХ СИСТЕМ ЗАКОНОВ СОХРАНЕНИЯ В ПРИЛОЖЕНИИ К ЗАДАЧАМ ГЕМОДИНАМИКИ

Янченко А.А.^{1, 2}¹ Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск² Новосибирский государственный университетE-mail: aya.home.nsk@gmail.com

Моделирование гемодинамики мозга важно, как с точки зрения фундаментальной механики сплошных сред, так и для медицинских приложений. Течение крови в сосудах головного мозга носит сложный характер и любые его нарушения приводят к серьезным последствиям. Артериовенозная мальформация (АВМ) - патологическая связь между венами и артериями в мозге (клубок хаотически переплетенных, перерожденных сосудов), в которой отсутствует капиллярная сеть, вследствие чего осуществляется прямое шунтирование крови из артериального бассейна в венозный. Таким образом АВМ нарушает нормальное кровообращение, приводит к хронической недостаточности кровообращения, может быть причиной разрыва патологически измененных сосудов и другим негативным последствиям в зависимости от строения и места расположения. Наиболее часто встречающаяся разновидность АВМ – рацемозная, состоящая из хаотически переплетенных и связанных друг с другом сосудов весьма малого диаметра (0.1 мм и менее).

Одним из подходов к моделированию гемодинамики мозга является рассмотрение кровеносного русла в области мелких сосудов как пористого пространства. Для получения уравнений течения жидкости в упругой пористой среде применяется метод термодинамически согласованных систем законов сохранения. Данный подход успешно применялся для построения моделей течения двухфазных жидкостей. В общем виде такая система записывается в терминах порождающего термодинамического потенциала и порождающих переменных. При использовании этого подхода все уравнения системы принимают дивергентный вид, она может быть приведена к симметричной форме и является гиперболической при условии выпуклости порождающего потенциала [1, 2], что позволяет применять уже разработанные методы для исследования и моделирования описываемого этой системой процесса. Согласно формализму термодинамически согласованных систем законов сохранения необходимо задать зависимость обобщенной энергии от параметров состояния. В данной модели мы выбираем обобщенную энергию как среднюю по массовой концентрации внутреннюю энергию фаз, дополненную кинетической энергией относительного движения:

$$E = c_1 e^1 + c_2 e^2 + \frac{1}{2} c_1 c_2 w_i w_i,$$

где c_1, c_2 - массовые концентрации упругой среды и жидкой соответственно, e^1, e^2 - внутренние энергии

упругой и жидкой среды, w_i - относительная скорость движения упругой среды относительно жидкой.

Для задания внутренней энергии жидкой фазы мы воспользовались уравнением состояния для слабосжимаемого газа. Внутренняя энергия упругой пористой среды состоит из суммы энергий однородной деформации и сдвиговой деформации. Энергия однородной деформации определяется тем же уравнением состояния (слабосжимаемого газа), что и для жидкой фазы, но со своими постоянными среды. Энергия сдвиговой деформации, используемая в модели, предложена в работе [3]. При таком выборе внутренних энергий фаз система уравнений, описывающая течение жидкости сквозь упругий пористый скелет, является гиперболической.

Построение математической модели церебрального кровообращения основывается на клинических данных, характеризующих течение крови в сосудах головного мозга в норме и при наличии аномалии [4]. Клинические данные позволяют определить физические параметры среды и верифицировать построенные модели.

Для проведения численных расчетов построены вычислительные алгоритмы на основе методов, развитых для гиперболических систем законов сохранения. Основой является метод конечных объемов, для дискретизации по пространству применяется WENO-алгоритм, а для дискретизации по времени — метод Рунге-Кутты.

Разработанная модель позволит более адекватно описывать гемодинамику мозговых сосудов в норме и при аномалии.

1. Е.И. Роменский. Термодинамически согласованная система законов сохранения течения сжимаемой жидкости в пористой упругой среде // Сибирский журнал индустриальной математики, 2011, V. 14, No. 4, P. 48.
2. С.К. Годунов, Е.И. Роменский. Элементы механики сплошных сред и законы сохранения // Новосибирск, Научная книга, 1998. 280 с.
3. S. Gavrilyuk, S. Ndanou, S. Hank. An Example of a One-Parameter Family of Rank-One Convex Stored Energies for Isotropic Compressible Solids // Journal of Elasticity, 2016, V. 124, No. 1, P. 133-141.
4. А.П. Чупахин, А.А. Черевко, А.К. Хе, А.Л. Кривошапкин и др. Измерения и анализ локальной церебральной гемодинамики у больных с сосудистыми мальформациями головного мозга // Патология кровообращения и кардиохирургия, 2012, V. 16, No. 4, P. 27-31.

Работа поддержана РФФИ (грант №16-31-00223) и Министерством образования Российской Федерации (грант №14.W03.31.0002).

СОДЕРЖАНИЕ

Пленарные лекции:	
<u>Анисимов Михаил Прокопьевич</u> «The vapor-gas nucleation research»	4
<u>Бекежанова Виктория Бахытовна</u> Устойчивость двухслойных термокапиллярных течений	5
<u>Губайдуллин Амир Анварович</u> «Волны в насыщенных пузырьковой жидкостью пористых средах»	6
<u>Ждан Сергей Андреевич</u> «Непрерывная спиновая детонация труднодетонируемых топливно-воздушных смесей в кольцевых камерах сгорания»	7
<u>Исаев Сергей Александрович</u> «Разработка вычислительных технологий на композитных сетках, верификация модифицированной с учетом поправки на кривизну линий тока в рамках подхода роди-лещинера-исаева sst-модели 2003 года на тестовых задачах отрывного обтекания тел и численное моделирование интенсификации теплообмена в узких каналах с помощью поверхностных вихрегенераторов»	8
<u>Коротаев Геннадий Константинович</u> «Гидродинамическое моделирование как основа оперативных морских прогнозов»	9
<u>Кузнецов Владимир Васильевич</u> «Капиллярная гидродинамика и процессы переноса при фазовых переходах в микроразмерных системах»	10
<u>Куперштох Александр Леонидович</u> «Частичные разряды в конденсированных диэлектриках (обзор)»	11
<u>Нигматулин Булат Искандерович</u> «Атомная энергетика в России и мире. Состояние и развитие»	12
<u>Рыжков Александр Филиппович</u> «Развитие теории комбинированных парогазовых циклов с внутрицикловой газификацией»	13
<u>Santucci Stefan</u> «Intermittent avalanche dynamics of imbibition fronts»	14
<u>Смирнов Евгений Михайлович</u> «Трехмерное численное моделирование тепломассопереноса в тепловых трубах»	15
<u>Сон Эдуард Евгеньевич</u> «Гидродинамическая турбулентность: фундаментальные результаты и нерешенные проблемы, неклассические направления»	16
<u>Фрик Петр Готлобович</u> «Особенности турбулентного конвективного теплообмена в жидких металлах»	17
<u>Чесноков Александр Александрович</u> «Приближение мелкой воды в слоистых сдвиговых течениях неоднородной жидкости с массообменном»	18
Тезисы докладов:	
<u>Абаимов Николай Анатольевич</u>, Бурдуков А.П., Бутаков Е.Б., Осипов П.В., Рыжков А.Ф. «Экспериментальные и расчётные исследования двухступенчатой воздушной и паровоздушной поточной газификации каменного угля»	20
<u>Актершев Сергей Петрович</u>, Алексеенко С.В. «Нелинейные волны и теплоперенос в стекающей пленке жидкости с фазовым переходом»	21

Тищенко В.А., Алексеев Роман Андреевич , Гаврилов И.Ю., Грибин В.Г., Тищенко А.А. «Геометрическое воздействие на потоки крупных капель в межлопаточных каналах последних ступеней паровых турбин»	22
Anisimov M. P. , Hopke P.K. «The vapor-gas nucleation research»	23
Анискин Владимир Михайлович , Рудяк В.Я. «Измерение коэффициента теплоотдачи в цилиндрическом микроканале при использовании наножидкости на основе SiO_2 »	24
Ахметшина Альфия Илдусовна , Павлов Г.И., Сабирзянов А.Н., Тихонов О.А. «Газодинамика реагирующих газов в вихревой топке»	25
Барташевич Мария Владимировна , Власенко М.Г., Дехтярь Р.А. «Моделирование совместного тепломассопереноса в пленке жидкости, движущейся по наклонной стенке, с учетом касательного напряжения на межфазной поверхности»	26
Бекежанова Виктория Бахытовна «Устойчивость двухслойных термокапиллярных течений»	27
Барышников А.С., Басаргин И.В., Безверхний Н.О., Бобашев Сергей Васильевич , Монахов Н.А., Попов П.А., Сахаров В.А., Чистякова М.В. «Распределение заряженных частиц вблизи фронта ударной волны в тлеющем разряде»	28
Большакова Екатерина Сергеевна , Кедринский В. К. «Формирование кавитационного кластера в окрестности квази-пустого разрыва»	29
Борд Елизавета Евгеньевна , Черевко А.А., Чупахин А.П. «Использование диаграмм найквиста для анализа обобщенного уравнения ван дер Поля – дуффинга, описывающего гемодинамику церебральных сосудов»	30
Быковский Федор Афанасьевич , Ждан С.А., Ведерников Е.Ф. «Непрерывная спиновая детонация синтез-газа с воздухом в плоскорадиальной вихревой камере сгорания»	31
Виноградов Дмитрий Андреевич , Тепляков И.О., Ивочкин Ю.П., Клементьева И.Б. «Исследование структуры электровихревых течений в под действием внешнего магнитного поля»	32
Власенко Максим Григорьевич , Чернов А. А., Барташевич М. В., Дехтярь Р. А. «Абсорбция из одиночного парового пузырька в растворе бромида лития»	33
Вожаков Иван Сергеевич , Архипов Д.Г., Цвелодуб О.Ю. «Исследование эволюции периодических волновых режимов на стекающей пленке жидкости»	34
Грибин В.Г., Тищенко Александр Антонович , Тищенко В.А., Гаврилов И.Ю., Хомяков С.В., Попов В.В., Алексеев Р.А. «Формирование потоков капель в межлопаточном канале сопловой турбинной решетки»	35
Гешева Елизавета Сергеевна , Шторк С.И. «Оценка эффективности использования закрученного потока с образованием спиральных вихрей»	36
Черевко А.А., Гологуш Татьяна Сергеевна , Остапенко В.В. «Численное моделирование эмболизации как задачи двухфазной фильтрации»	37
Гончарова Ольга Николаевна «Классификация двухслойных течений в трехмерном канале с испарением на термокапиллярной поверхности раздела»	38
Григорьев Сергей Анатольевич , Танчук В.Н., Локиев В.А., Рошаль А.Г., Михалюк Д.С., Капранов И.Е. «Анализ системы воздушного охлаждения аварийных резисторов термоядерной установки ИТЭР»	39
Губайдуллин Амир Анварович , Болдырева О.Ю., Дудко Д.Н. «Волны в насыщенных пузырьковой жидкостью пористых средах»	40
Давлетшин Ирек Абдуллович , Паерелий А.А. «Особенности теплоотдачи начального участка канала на пульсирующих режимах течения теплоносителя»	41
Дектерев Александр Анатольевич , Филимонов С.А., Михиенкова Е.И., Бойков Д.В. «Гибридные методы моделирования гидродинамики и теплообмена в разномасштабных (1d-3d) моделях»	42
Дектерев Дмитрий Александрович , Минаков А.В., Платонов Д.В., Масленникова А.В., Абрамов А.В. «Исследование низкочастотных вибраций гидроагрегата, вызванных пульсациями давления в потоке»	43
Денисенко Никита Сергеевич , Черевко А.А., Кулик В.М., Чупахин А.П. «Экспериментальное и аналитическое исследование течения вязкой жидкости в упругой трубе моделирующей артерию»	44
Деревич Игорь Владимирович , Щадинский Д.М. «Метод функции плотности вероятности для описания турбулентного тепло и массопереноса в газодисперсном потоке с учетом горения частиц и межчастичных столкновений»	45

Генбач А.А., <u>Джаманкулова Нелля Орналиевна</u> «Исследование и расчет капиллярно-пористого теплообменника»	46
Аньшаков А.С., Алиферов А.И., <u>Домаров Павел Вадимович</u> , Синецын В.А., Урбах А.Э. «Численное моделирование сложного тепло- массообмена при газификации техногенных отходов в шахтной печи с плазменно-омическим нагревом»	47
Демышев С.Г., <u>Дымова Ольга Алексеевна</u> «Численный анализ энергетического баланса черного моря в 2011 г»	48
Афанасьева С.А., Буркин В.В., <u>Дьячковский Алексей Сергеевич</u> , Ищенко А.Н., Чупашев А.В. «Взаимодействие высокопрочных суперкавитирующих ударников с монолитными преградами в воде»	49
<u>Евграфова Анна Валерьевна</u> , Кучинский М. О., Сухановский А. Н. «Процессы теплообмена в неоднородно нагретом горизонтальном слое жидкости»	50
<u>Евстигнеева Наталья Александровна</u> «Расчеты гидрофизических полей в прибрежных регионах черного моря с высоким пространственным разрешением»	51
Мелешкин А.В., <u>Елистратов Дмитрий Сергеевич</u> , Чернов А.А., Пильник А.А. «Экспериментальное исследование гидратообразования фреона 134а в циклическом процессе кипения – конденсации при варьировании уровня рабочего объема»	52
Быковский Ф.А., <u>Ждан Сергей Андреевич</u> Непрерывная спиновая детонация труднодетонируемых топливно-воздушных смесей в кольцевых камерах сгорания	53
<u>Жигарев Владимир Алексеевич</u> , Минаков А.В., Неверов А.Л., Пряжников М.И., Гузей Д.В. «Исследование неньютоновских течений буровых растворов в скважинах»	54
Павленко А.Н., <u>Жуков Владимир Егорович</u> , Печеркин Н.И., Li X., Sui H. «Контролируемое орошение структурированной насадки как способ повышения эффективности разделения смеси жидкости в дистилляционной колонне»	55
<u>Запрягаев Иван Игоревич</u> , Тимошевский М.В., Первунин К.С. «Кавитация в щелевом зазоре: высокоскоростная визуализация и PIV измерения»	56
<u>Зарипов Динар Ильясович</u> , Renfu Li «Высокопроизводительный алгоритм расчета полей скорости по результатам обработки PIV-изображений»	57
<u>Иванов Михаил Федорович</u> , Киверин А.Д., Метёлкин Н.А., Яковенко И.С. «Структура волн горения в плохо перемешанной горючей смеси»	58
<u>Ильмов Дмитрий Николаевич</u> «Расчетно-экспериментальные исследования характеристик теплообменных панелей для систем преобразования энергии космических энергоустановок большой мощности»	59
<u>Ильсова Ольга Хисамовна</u> , Мосунова Н.А. «Исследование переноса трития в контурах РУ»	60
<u>Илюшин Борис Борисович</u> «Опыт разработки и коммерциализации топливных элементов»	61
<u>Исаев Сергей Александрович</u> , Баранов П.А., Щелчков А.В. «Разработка вычислительных технологий на композитных сетках, верификация модифицированной с учетом поправки на кривизну линий тока в рамках подхода роди-лещинера-исаева sst-модели 2003 года на тестовых задачах отрывного обтекания тел и численное моделирование интенсификации теплообмена в узких каналах с помощью поверхностных вихрегенераторов»	62
<u>Кабардин Иван Константинович</u> , Наумов И.В., Окулов В.Л. «Исследование автомодельности завихренности и компонент скорости в ядре концевых вихрей в следе за ротором ветрогенератора»	63
<u>Кадыров Айдар Ильдусович</u> , Абайдуллин Б.Р. «Распад закрученного потока псевдопластичной жидкости в круглой трубе»	64
<u>Карпов Денис Иванович</u> , Куперштох А.Л. «Расчет электрических характеристик стримерных структур при пробое жидкого диэлектрика»	65
Мильман О.О., Ленев С.Н., Голов П.В., Шифрин Б.А., <u>Картусова Анна Юрьевна</u> «Аэродинамические численные расчеты разновысотной компоновки секций воздушно-конденсационных установок и сухих градиент при различных скоростях ветровых потоков»	66
<u>Кашкаров Алексей Олегович</u> , Пруэлл Э.Р., Тен К.А., Рубцов И.А., Кременко С.И., Просвирнин К.М., Киселев А.Н., Косолапов И.Э., Костицын О.В., Лобойко Б.Г., Музыря А.К. «Исследование детонации зарядов малых диаметров пластичного взрывчатого вещества с использованием синхротронного излучения»	67

Кашкарова Маргарита Владимировна , Куйбин П.А. «Диффузия винтового вихря»	68
Квон Александр Зедонович , Бобылев А.В., Гузанов В.В., Харламов С.М., Маркович Д.М. «Измерение полей скорости в трехмерных волнах при пленочном течении жидкости»	69
Китанин Эдуард Леонтьевич , Кравцов П.А., Трофимов В.А., Китанина Е.Э., Бондаренко Д.А. «Исследование диссипации электростатического заряда в авиационном керосине, находящемся в диэлектрическом топливном баке»	70
Князева Анна Георгиевна , Крюкова О.Н. «Моделирование управляемого синтеза интерметаллидных покрытий»	71
Козловский Юрий Михайлович , Савченко И.В., Самошкин Д.А., Яцук О.С. «Особенности теплового расширения некоторых постоянных магнитов на основе неодима и самария»	72
Кот Валерий Андреевич «Высокоточные полиномиальные решения классических задач Стефана»	73
Кравцов Захар Дмитриевич , Шараборин Д.К. «Экспериментальное исследование влияния внешнего акустического возмущения на динамику потока и фронта пламени в импактной струе»	74
Мильман О.О., Крылов Виктор Сергеевич , Кондратьев А.В., Птахин А.В. «Стенд для исследований конденсации пара и зависимости коэффициента теплоотдачи от массовой доли (до 20%) неконденсирующихся газов в парогазовой смеси»	75
Бурдуков А.П., Бутаков Е.Б., Кузнецов Артем Валерьевич «Исследования химической активности углей микропомолы различной степени метаморфизма»	76
Кузнецов Владимир Васильевич «Капиллярная гидродинамика и процессы переноса при фазовых переходах в микроразмерных системах»	77
Войтков И.С., Волков Р.С., Высокоморная О.В., Кузнецов Гений Владимирович , Стрижак П.А. «Экспериментальное определение температурных следов испаряющихся капель в разогретом воздушном потоке»	78
Куперштох Александр Леонидович , Карпов Д.И. «Эстафетный механизм распространения частичных разрядов при линейно нарастающем напряжении»	79
Ларионов Кирилл Борисович , Мишаков И.В., Зенков А.В. «Действие иницирующей добавки на характеристики горения каменного угля»	80
Левин Анатолий Алексеевич , Козлов А.Н. «Моделирование пиролиза древесной биомассы в шнековом реакторе»	81
Лежнин Сергей Иванович , Алексеев М.В., Прибатурин Н.А. «Применение релаксационной модели межфазного теплообмена для расчёта истечения жидкости с начальными сверхкритическими параметрами»	82
Лепешкин Александр Роальдович «Методы исследований теплофизических свойств материалов и покрытий с учетом эксплуатационных факторов»	83
Дектерев А.А., Литвинцев Кирилл Юрьевич , Гаврилов А.А., Харламов Е.Б. «Разработка инженерного свободно распространяемого программного комплекса для моделирования процессов гидрогазодинамики, теплообмена и химического реагирования»	84
Лобасов Александр Сергеевич , Минаков А.В. «Изучение влияния различных параметров на режимы смешения жидкостей в т-образном микромиксере»	85
Лобасов Алексей Сергеевич , Чикишев Л.М., Дулин В.М., Маркович Д.М. «Исследование турбулентного горения в закрученной струе оптическими методами»	86
Демьшев С.Г., Маркова Наталья Владимировна «Анализ глубоководных течений черного моря на основе численных экспериментов и данных наблюдений»	87
Марфин Евгений Александрович , Абдрашитов А.А., Кравцов Я.И. «Проницаемость пористой среды в поле упругих колебаний»	88
Медведев Руслан Николаевич , Чуркин Д.С. «Индукционный вч разряд в парах воды в кольцевой геометрии»	89
Мелешкин Антон Викторович , Елистратов Д.С., Чернов А.А., Пильник А.А. «Влияние температуры рабочего участка на процесс гидратообразования методом взрывного вскипания сжиженного гидратообразователя в объеме воды при декомпрессии»	90
Минаков Андрей Викторович , Платонов Д.В., Дектерев Д.А. «Экспериментальное исследование холостого пропуска через гидроагрегат высоконапорной ГЭС на модельном стенде»	91

<u>Мисюра Сергей Яковлевич</u> , Донской И.Г. «Диссоциация газовых гидратов при различном гранулированном составе»	92
Молочников В.М., Кратиров Д.В., <u>Михеев Андрей Николаевич</u> «Исследование структуры потока за местными сопротивлениями в трубах оптическим методом»	93
<u>Михеев Николай Иванович</u> , Душин Н.С., Саушин И.И. «Техника измерения динамики векторных полей скорости на основе дымовой визуализации потока»	94
<u>Михиенкова Евгения Игоревна</u> , Неверов А.Л., Матвеев А.В., Жигарев В.А., Кудрявцев И.В. «Исследование влияния добавки наночастиц на гидродинамические характеристики буровых растворов»	95
Крайнов А.Ю., <u>Моисеева Ксения Михайловна</u> «Влияние состава смеси на минимальную энергию искрового зажигания аэрозвеси угольной пыли»	96
Моисеенко Е. В., Дробышевский Н. И., Токарев Ю. Н., <u>Бутов Роман Александрович</u> «Трёхмерное численное моделирование теплового состояния пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов»	97
<u>Молочников Валерий Михайлович</u> , Калинин Е.И., Мазо А.Б., Малюков А.В., Охотников Д.И., Душина О.А. «Формирование вихревых структур за препятствием в канале на режимах перехода к турбулентности в стационарном и пульсирующем потоках»	98
<u>Морозов Андрей Владимирович</u> , Питык А.В., Рагулин С.В., Сахипгареев А.Р., Сошкина А.С., Шлепкин А.С. «Влияние процессов массопереноса на накопление и кристаллизацию борной кислоты в активной зоне ввэр в случае аварии»	99
<u>Морозов Владимир Сергеевич</u> , Мисюра С.Я. «Влияние различных факторов на десорбцию капли»	100
<u>Мусакаев Наиль Габсалямович</u> , Хасанов М.К. «Образование гидрата CO ₂ в пористом пласте при инъекции жидкого диоксида углерода с учетом его кипения»	101
<u>Мухин Константин Андреевич</u> , Анискин В.М. «Экспериментальное исследование структуры дозвуковых микроструй воздуха истекающих в затопленное пространство»	102
Павленко А.Н., Жуков В.Е., Печеркин Н.И., <u>Назаров Александр Дмитриевич</u> , Li X., Sui H. «Распределение локальных параметров потоков по сечению дистилляционной колонны в процессе разделения смеси жидкостей при периодическом изменении конфигурации точек орошения структурированной насадки»	103
<u>Наумов Игорь Владимирович</u> , Шарифуллин Б.Р., Штерн В.Н. «Капиллярный гистерезис ограниченного закрученного потока двухкомпонентной жидкости»	104
<u>Небучинов Александр Сергеевич</u> «Экспериментальное исследование теплообмена в импактной струе с шевронами»	105
<u>Никулин Виктор Васильевич</u> «Критерий влияния выталкивающей силы на движение плавучего вихревого кольца»	106
Фортова С.В., Шепелев В. В., Трошкин О.В., <u>Опарина Елена Ивановна</u> , Козлов С.А. «Численное моделирование развития неустойчивости Рэлея-Тейлора и Рихтмайера-Мешкова»	107
<u>Павлов Григорий Иванович</u> , Теляшов Д.А., Кочергин А.В., Накоряков П.В., Суховая Е.А. «Исследование снижения интенсивности ударных волн в «псевдокипящем» слое»	108
Газизов И.М., Давлетшин И.А., <u>Паерелий Антон Александрович</u> «Определение локальных коэффициентов теплоотдачи по измерениям температуры стенки»	109
Ничик М.Ю., Тимошевский М.В., <u>Первушин Константин Сергеевич</u> , Маркович Д.М. «Пузырьковые свободные и импактные струи в условиях пульсаций расхода: экспериментальное исследование методами PIV/PFBI/PTV»	110
<u>Перепечко Людмила Николаевна</u> , Шарина И.А. «Способы защиты изобретений в области компьютерного моделирования физических систем и процессов»	111
<u>Пильник Андрей Александрович</u> , Чернов А.А. «Точное решение задачи о сегрегации растворенного в расплаве газа движущимися фронтами кристаллизации»	112
<u>Платонов Дмитрий Викторович</u> , Минаков А.В., Дектерев Д.А., Масленникова А.В. «Явление перезамыкания прецессирующего вихревого жгута в гидротурбине Френсиса»	113
<u>Плотников Леонид Валерьевич</u> «Особенности газодинамики и локальной теплоотдачи в газоздушных трактах поршневых двигателей с наддувом»	114

<u>Поливода Федор Анатольевич</u>	115
«Исследование теплофизических характеристик органических рабочих тел фреонового ряда для создания энергоустановок с ORG - циклом Ренкина»	
<u>Пряжников Максим Иванович</u> , Минаков А.В., Гузей Д.В.	116
«Исследование коэффициентов переноса наножидкостей с углеродными наноматериалами»	
Коробейников С.М., <u>Ридель Александр Викторович</u> , Бычков А.Л.	117
«Исследование поведения газовых пузырьков в трансформаторном масле»	
<u>Рубцов Иван Андреевич</u> , Прууэл Э.Р., Тен К.А., Кашкаров А.О., Кременко С.И.	118
«Проводимость взрывчатых веществ при добавлении углеродных нанотрубок»	
<u>Рыженьков Владимир Олегович</u> , Мулладжанов Р.И.	119
«Численное исследование ближней области кольцевой турбулентной струи»	
<u>Самодуров Анатолий Сергеевич</u> , Чухарев А.М.	120
«Интенсивность вертикального турбулентного обмена в верхнем слое пикноклина черного моря вокруг крымского полуострова»	
Михеев Н.И., <u>Саушин Илья Ирекович</u>	121
«Исследование пограничного слоя при положительном продольном градиенте давления методом Smoke Image-Velocimetry»	
<u>Скрипкин Сергей Геннадьевич</u> , Цой М. А., Куйбин П. А	122
«Апериодические пульсации давления при работе гидротурбины в неоптимальном режиме»	
Панов Д.О., <u>Смирнов Евгений Михайлович</u> , Егоров С.В., Лобачев М.П.	123
«Численное исследование кавитационных явлений в водометном движителе, включая опыт вихреразрешающего моделирования»	
<u>Смовж Дмитрий Владимирович</u> , Костогруд И.А.	124
«Термохимический синтез графена на медной фольге»	
<u>Сухановский Андрей Николаевич</u> , Евграфова А.В., Теймуразов А.С., Попова Е.Н.	125
«Распределение спиральности во вращающемся слое с локализованным источником тепла»	
<u>Табакаев Роман Борисович</u> , Астафьев А.В., Николаева В.И.	126
«Зависимость величины теплового эффекта пиролиза от элементного состава биомассы»	
<u>Тен Константин Алексеевич</u> , Прууэл Э.Р., Кашкаров А.О., Рубцов И.А., Шехтман Л.И., Жуланов В.В., Толочко Б.П.	127
«Сравнения методик измерения распределения массы в процессах пыления»	
<u>Тесленко Вячеслав Степанович</u> , Дрожжин А.П., Медведев Р.Н.	128
«Динамика импульсов силы и пульсаций пузыря при сжигании газов на тяговой стенке в воде»	
<u>Тимофеев Иван Валерьевич</u> , Анискин В.М.	129
«Экспериментальное исследование ударно-волновой структуры недорасширенных сверхзвуковых микроструй»	
<u>Тимошевский Михаил Викторович</u> , Запрягаев И.И., Первунин К.С., Маркович Д.М.	130
«Генерация пристенной струи для управления кавитацией на гидрокрыле»	
<u>Толмачева Кристина Игоревна</u> , Боронин С.А., Осипцов А.А.	131
«Перенос частиц при многофазной фильтрации»	
<u>Трифонов Николай Николаевич</u> , Сухоруков Ю.Г., Николаенкова Е.К., Святкин Ф.А.	132
«Особенности работы оборудования тепловой схемы турбин АЭС в переменных режимах»	
<u>Троцюк Анатолий Владиславович</u>	133
«Численное исследование структур течения с наклонной детонационной волной в гиперзвуковой кольцевой цилиндрической камере»	
<u>Усов Эдуард Викторович</u> , Чухно В.И., Кутлиметов А.Э., Прибатурин Н.А.	134
«Численное моделирование снарядного режима течения при истечении газа в жидкий металл»	
<u>Филимонов Михаил Юрьевич</u> , Ваганова Н.А.	135
«Моделирование эксплуатации факельной установки и ее теплового воздействия на вечную мерзлоту»	
<u>Филиппов Прокопий Степанович</u> , Левин Е.И., Рыжков А.Ф.	136
«Анализ влияния режимов подготовки топлива и воздуха на экологические показатели ПГУ-ВЦГ»	
<u>Фомин Владимир Владимирович</u>	137
«Численное моделирование ветровых волн в черном море, генерируемых атмосферными циклонами»	
<u>Фортова Светлана Владимировна</u> , Уткин П.С., Пронина А.П., Наркунас Т.С., Шепелев В.В.	138
«Numerical simulation of the impact of high-speed metallic plates using two approaches»	

Борзенко Е.И., Рыльцев И.А., Фролов Олег Юрьевич , Шрагер Г.Р. «Неизотермическое заполнение плоского канала степенной жидкостью»	139
Архипов Д.Г., Сафарова Н.С., Хабахпашев Георгий Алексеевич «Моделирование взаимодействия слабонелинейных пространственных волн на свободной поверхности неглубокого слоя вязкой жидкости»	140
Харламов Георгий Владимирович , Жилкин С.В. «Моделирование самодиффузии в газах и жидкостях методом молекулярной динамики»	141
Цвелодуб Олег Юрьевич , Бочаров А.А. «Исследование ветвлений волновых режимов на стекающей пленке жидкости, увлекаемой потоком газа»	142
Чемезов Алексей Вениаминович «Технико-экономическая оценка методов очистки дымовых газов тепловых электростанций от диоксида углерода и перспектив их внедрения в России»	143
Тальгамер Б.Л., Чемезов А.В., Чемезова Елена Юрьевна «Эффективность использования бурых углей магаданской области при производстве водорода»	144
Чепак-Гизбрехт Мария Владимировна «Массообмен при электроконтактном спекании с учетом эффекта Соре»	145
Черданцев Михаил Викторович , Черданцев А.В., Исаенков С.В., Маркович Д.М. «Исследование развития волн возмущения в дисперсно-кольцевом течении»	146
Чернов Андрей Александрович , Пильник А.А., Давыдов М.Н. «Неравновесный механизм роста газового пузырька в высоковязком газонасыщенном расплаве»	147
Чернышев Александр Сергеевич , Шмидт А.А. «Эволюция распределения пузырей по размерам при восходящих и нисходящих течениях жидкости»	148
Гаврилюк С.Л., Ляпидевский В.Ю., Чесноков Александр Александрович «Приближение мелкой воды в слоистых сдвиговых течениях неоднородной жидкости с массообменном»	149
Шепелев Вадим Владимирович , Фортова Светлана Владимировна, Иногамов Н.А. «Численное моделирование образования отверстий при облучении тонкопленочных мишеней ультракороткими лазерными импульсами»	150
Шестаков Максим Владимирович , Токарев М.П., Маркович Д.М. «Трехмерная структура течения в ближнем поле квази-двумерной турбулентной струи»	151
Анисимов М.П., Терехов В.И., Шишкин Николай Енинархович «Влияние поверхностно-активного вещества на интенсивность испарения и кинетику генерации паровых зародышей в каплях воды»	152
Шмакова Наталья Дмитриевна , Флёр Я.-Б., Соммерия Ж., Вуазан Б. «Фокусировка внутренних волн при больших числах Стокса»	153
Шульга Татьяна Яковлевна «Анализ результатов численного моделирования и данных спутниковых наблюдений распространения загрязнений в азовском море»	154
Юсупов Роман Равильевич , Красинский Д.В., Шторк С.И. «Исследование аэродинамической структуры изотермического закрученного течения в двухступенчатом горелочном устройстве»	155
Ягодницына Анна Александровна , Ковалев А.В., Бильский А.В. «Экспериментальное исследование течения ионная жидкость – вода в микроканалах т-типа с различным отношением глубины к ширине»	156
Янькова Галина Сергеевна , Черевко А.А., Паршин Д.В. «Влияние некоторых генетических особенностей и заболеваний на строение кровеносной ситемы головного мозга малых лабораторных животных»	157
Янковский Станислав Александрович , Толокольников А.А., Губин В.Е. «Теплофизические свойства композиционного топлива на основе угля марки т (Алардинское месторождение) и отходов лесопромышленного производства»	158
Янченко Арсений Александрович «Моделирование течения жидкости сквозь упругий пористый скелет на основе термодинамически согласованных систем законов сохранения в приложении к задачам гемодинамики»	159

ТЕПЛОФИЗИКА И ФИЗИЧЕСКАЯ ГИДРОДИНАМИКА

II Всероссийская научная конференция
с элементами школы молодых ученых

11 – 17 сентября 2017 г.

Республика Крым, г. Ялта

Т е з и с ы д о к л а д о в

Ответственный за выпуск
Шестаков М.В.

Подписано к печати 24.08.2017 г. Печать офсетная.
Бумага офсетная. Формат 60/84/16. Усл. печ. л. 10.5
Тираж 170 экз. Заказ № 395

Отпечатано в типографии «Срочная полиграфия»
ИП Малыгин Алексей Михайлович
630090, г. Новосибирск, пр.-т Академика Лаврентьева, 6/1, оф. 104
Тел. (383) 217-43-46, 8-913-922-19-07