

Организаторы

**XXV Школы-семинара молодых
ученых и специалистов академика
А.И. Леонтьева**

**Рыбинский государственный
авиационный технический университет
имени П.А. Соловьева**

**Передовая инженерная школа
«Технологии двигателестроения»**

ПАО «ОДК Сатурн»

Российская академия наук

**Национальный комитет РАН по тепло- и
массообмену**

**Министерство науки и высшего
образования Российской Федерации**

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

МАЛОИНЕРЦИОННАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНЫХ ИНЦИДЕНТОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АНАЛИЗА ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Вследствие довольно масштабных последствий возгораний в жилых зданиях и производственных помещениях разработка и создание новых эффективных подходов в области раннего обнаружения возгораний является актуальной научно-технической задачей. В связи с этим *целью работы* являлось создание по результатам экспериментальных и численных исследований системы идентификации пожаровзрывоопасных инцидентов. Система предназначена для малоинерционного обнаружения, локализации и ликвидации возгораний на основе нейросетевого анализа характеристик тепломассообменных процессов в изолированном пространстве с использованием группы датчиков, сенсоров и систем с учетом специфики технологического процесса, а также выдачи рекомендаций по тушению.

Принцип действия разработанной системы [1,2] состоит в том, что с использованием заранее обученной путем обработки больших наборов экспериментальных данных нейронной сети сравнивают данные, полученные расположенными в помещении пожарными извещателями тепловыми, дымовыми и пламени, газоаналитическими сенсорами, системой видеорегистрации, с данными, на которых нейронная сеть была обучена. На основе сравнения осуществляют выбор группы данных, содержащих близкое совпадение. По наиболее близкому совпадению, выраженному в процентах, идентифицируют тип материала и причину возгорания. Руководствуясь полученными данными, выдают соответствующие возгоранию рекомендации по тушению: время тушения, тип тушащего состава, его расход [1,2]. Это позволяет быстрее оценить пожарную опасность в помещении и выработать стратегию по тушению очага пожара.

В ходе экспериментальных исследований обосновано, что основной поток информации система получает максимально быстро с видеокamеры, как сенсора системы. При этом наиболее важной информацией, получаемой с использованием камеры видеонаблюдения, являются: координаты местоположения очага возгорания, его размеры, причина инцидента, тип материала в зоне регистрации.

Разработан подход по получению аналогичного потока информации с применением акустических сенсоров в режиме мониторинга состояния помещения и даже в процессе подавления возгораний в нем. Звуковой поток, воспринимаемый микрофоном, пропускается через цифровой полосовой фильтр, полосы пропускания которого совпадают с основными пиками спектра конкретного горючего материала. В случае горения данного материала, сигнал на выходе фильтра превысит порог значимости, а временной тренд этого сигнала пропорционален интенсивности горения. В памяти микроконтроллера реализовано семейство цифровых фильтров, работающих параллельно и соответствующих основным классам горючих материалов. В зависимости от того какой фильтр выдал превышение порога, можно сделать заключение о типе горящего материала.

В отличие от общепринятых подходов [3–5] по обнаружению возгорания предложенный подход не ограничен объемами помещения и позволяет обнаружить возгорание даже на больших открытых пространствах и при непрогнозируемом перемещении фронта пламени. В целом использование разработанной интеллектуальной системы позволяет с вероятностью 85–94 % идентифицировать тип горючего материала, причину возгорания и определять минимально необходимые время тушения и расход тушащего состава.

Список литературы

1. Kuznetsov G.V., Volkov R.S., Sviridenko A.S., Strizhak P.A. Reduction of response time of fire detection and containment systems in compartments // *Fire Safety Journal*. 2024. V. 144. Article number 104089
2. Kuznetsov G.V., Zhdanova A.O., Volkov R.S., Sviridenko A.S., Strizhak P.A. Smoke deposition and extraction in compartment fires with different ignition sources // *Process Safety and Environmental Protection*. 2024. V. 187. P. 581–592.
3. J. Baek, T.J. Alhindi, Y.S. Jeong, M.K. Jeong, S. Seo, J. Kang, W. Shim, Y. Heo, Real-time fire detection system based on dynamic time warping of multichannel sensor networks // *Fire Saf. J.* 2021. 123. 103364.
4. N. Qu, Z. Li, X. Li, S. Zhang, T. Zheng, Multi-parameter fire detection method based on feature depth extraction and stacking ensemble learning model // *Fire Saf. J.* 2022. 128. 103541.
5. D.T. Gottuk, M.J. Peatross, R.J. Roby, C.L. Beyler, Advanced fire detection using multi-signature alarm algorithms // *Fire Saf. J.* 2002. 37. P. 381–394.

P.A. Strizhak

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

30

**LOW-RESPONSE IDENTIFICATION OF FIRE AND EXPLOSION
HAZARDOUS INCIDENTS BASED ON THE RESULTS OF HEAT
AND MASS TRANSFER PROCESSES ANALYSIS**

С.А. Исаев^{1,2}

¹ Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
Россия, 191001, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3

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

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ САМООРГАНИЗАЦИИ ТОРНАДОПОДОБНЫХ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР И ЭКСТРАОРДИНАРНЫХ ПЕРЕПАДОВ ДАВЛЕНИЯ

Интенсификация теплообмена является актуальной областью теплофизики по наукометрическим данным, начиная с 2005 года. Конструирование энергоэффективных структурированных поверхностей на основе вихревых генераторов давно находится в центре внимания. Опережающий рост теплоотдачи от них в сочетании с умеренным ростом гидравлических потерь в трактах по сравнению с гладкими стенками характерен для упорядоченных вогнутостей. Интенсификация сопутствующих гидродинамических процессов в наклонных протяженных канавках со сферическими законцовками связывается с ростом местных скоростей потока до величин соразмерных с характерной и превосходящей ее. В центре внимания открытия формирование экстраординарных перепадов давления, обусловленных торможением потока на наветренных склонах и самогенерацией смерчеобразных структур во входных сферических сегментах. Аномальная интенсификация отрывного течения и теплообмена (АИОТТ) в канавках характеризуется многократным ростом абсолютных величин отрицательного трения и числа Нуссельта относительно величин для плоской стенки [1]. Экспериментально и численно установлено, что она реализуется при глубинах и длинах канавок свыше 0.2 и 3 в долях их ширины соответственно, в диапазоне углов наклона от 25 до 80 градусов при числах Рейнольдса от 250 до 200000. Прогнозируемая максимальная относительная суммарная теплоотдача для рельефов с наклонными канавками для ламинарного и турбулентного режима достигает 3-4 при отстающем росте относительных гидравлических потерь, а максимальное локальное ускорение скорости в ядре потока доходит до 1.5 раз по отношению к максимальной скорости потока в плоскопараллельном канале [2].

Для начального гидродинамического участка в канале и на пластине кардинальное влияние на АИОТТ оказывает интерференция течения и теплообмена в однорядных ограниченных и больших пакетах канавок [3].

Детально рассмотрены постановки задач внутренней и внешней аэродинамики и теплообмена структурированных канавками поверхностей с особым вниманием к определению гидравлических потерь и обоснованию выбора SST-модели турбулентности, в частности с коррекцией на кривизну линий тока. Валидация основанного на многоблочных вычислительных технологиях пакета VP2/3 выполняется при сравнении баз данных измерений датчиками давления, методами SIV и градиентной теплотометрии, полученных на экспериментальных стендах НИИ механики МГУ, КазНЦ РАН и СПбПУ Петра Великого, с численными прогнозами на их цифровых двойниках [4-6].

Список литературы

1. Isaev S., Gritckevich M., Leontiev A., Popov I. Abnormal enhancement of separated turbulent air flow and heat transfer in inclined single-row oval-trench dimples at the narrow channel wall // Acta Astronautica. 2019. Vol. 163 (Part A). P. 202–207.
2. Исаев С.А. Генезис аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена в наклонных канавках на структурированных поверхностях. Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2022. - №5. - С.13-24.
3. Исаев С.А., Мильман О.О., Ключ А.А., Никущенко Д.В., Хмара Д.С., Юнаков Л.П. Аномальная интенсификация теплообмена при отрывном обтекании зигзагообразного плотного пакета наклонных канавок на стенке канала при различных температурных граничных условиях. Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2024. - №2. - С.71-93.
4. Исаев С.А., Судаков А.Г., Никущенко Д.В., Усачов А.Е., Зубин М.А., Синявин А.А., Чулюнин А.Ю., Дубко Е.Б. Тесты для валидационных задач аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена на структурированных поверхностях с экстраординарными перепадами давления. Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2023. - №5. - С.70-81.
5. Исаев С.А., Сапожников С.З., Никущенко Д.В., Митяков В.Ю., Сероштанов В.В., Дубко Е.Б. Аномальная интенсификация вихревого теплообмена при отрывном обтекании воздухом наклонной канавки на нагретом изотермическом участке пластины. Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2024. - №1. - С.52-62.
6. Исаев С.А., Мильман О.О., Михеев Н.И., Никущенко Д.В., Душин Н.С., Ключ А.А., Осипук Е.А. Взаимосвязь локального ускорения ламинарного потока в канале с аномальной интенсификацией теплообмена в двухрядных наклонных канавках. Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2024. - №4. - С. 28-52.

S.A.Isaev ^{1,2}

¹ Saint-Petersburg State Marine Technical University,
Russia 191001, Saint-Petersburg, Lotsmanskaya St., 3

² A. A. Novikov Saint-Petersburg State University of Civil Aviation,
Russia 196210, Saint-Petersburg, Pilots St., 38

PHYSICAL PRINCIPLES OF FORMATION OF ENERGY-EFFICIENT SURFACES BASED ON SELF-ORGANIZATION OF TORNADO-LIKE VORTEX STRUCTURES AND EXTRAORDINARY PRESSURE DROP

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ГТД/ГТУ

При проектировании современных газотурбинных двигателей и энергетических установок (ГТУ) наибольшую сложность представляет разработка их “горячей части”. Даже при наличии современных вычислительных инструментов довольно трудно достоверно предсказывать хотя бы общий тренд – снижение или рост выбросов NO_x после внесения изменений в конструкцию камеры сгорания газотурбинной установки и фронтального устройства. В связи с этим очень важно иметь возможность получить достоверные экспериментальные данные, позволяющие валидировать используемые численные коды, а также выявлять особенности механизмов стабилизации пламени в камере сгорания ГТУ. Поэтому представляется целесообразным детально исследовать процессы в модельных камерах сгорания с оптическим доступом в условиях, близких к натурным по температуре и давлению. Панорамные оптические методы диагностики потоков позволяют за довольно малое время получать массив экспериментальных данных о структуре течения, положении фронта пламени и характеристиках массопереноса, требуемых для верификации моделей численного расчета, а также выявлять особенности механизма стабилизации пламени.

Актуальность данного направления исследований обусловлена острой необходимостью создания и развития отечественной современной энергоэффективной газотурбинной техники, удовлетворяющей высоким экологическим требованиям. В настоящее время наиболее перспективной технологией, позволяющей снизить выбросы вредных веществ, является сжигание бедной топливовоздушной смеси (с избытком воздуха). Однако применение данной технологии сталкивается с рядом существенных проблем, без решения которых создание эффективного и надежного оборудования не представляется возможным. Пламя бедной смеси довольно сложно стабилизировать в широком диапазоне расходов, что необходимо для эффективной работы в режимах, отличающихся от номинального. В камере сгорания могут возникать термоакустические явления, которые приводят к вибрационному горению, погасанию пламени или его проскоку внутрь горелочного устройства и разрушению конструктивных элементов камеры сгорания.

При разработке современных камер сгорания применяются методы численного моделирования процессов смесеобразования и горения как жидкого, так и газообразного топлива. При этом имеющихся вычисли-

тельных мощностей явно недостаточно для проведения достоверных расчетов с использованием современных вихреразрешающих методов. Кроме того, довольно сложно прогнозировать возникновение нестационарных явлений, связанных с наличием крупномасштабных когерентных вихревых структур в потоке. Так, при организации закрученного течения в камере сгорания сложной конструкции ГТУ критически важны наличие и протяженность областей возвратного течения, а также структура течения вблизи стенок жаровой трубы.

Очевидно, что при существенных затратах времени на проведение детальных расчетов большую роль начинают играть экспериментальные исследования на упрощенных моделях камеры сгорания, отражающих важные особенности режимов подачи в нее топлива и воздуха, а также структуры течения. При использовании современных методов оптической панорамной диагностики потоков в единицу времени поступает большой массив экспериментальных данных о мгновенной структуре течения. Проведение таких экспериментов, безусловно, требует высокой квалификации специалистов и является довольно сложной задачей, но позволяет получить уникальную достоверную информацию, востребованную при проектировании реальных устройств.

В данной работе представлен опыт по исследованию процессов распыла и горения топлива в камерах сгорания модельной и реалистичной геометрии с применением методов оптической диагностики многофазных и реагирующих течений. Приведены примеры передовых экспериментальных стендов, моделирующих течение и горение в камерах сгорания газотурбинного типа, указаны необходимые режимные параметры и используемые технические решения, позволяющие эффективно проводить измерения современными методами оптической диагностики. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-79-30075, <https://rscf.ru/project/19-79-30075/>.

V. M. Dulin

Kutateladze Institute of Thermophysics,
Russia 630090, Novosibirsk, Lavrentyev Avenue, 1

MODELLING OF PROCESSES IN THE COMBUSTION CHAMBERS OF GAS TURBINES/ENGINES

О.В. Митрофанова^{1,2}

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

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

ВИХРЕВОЙ ЭФФЕКТ В ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ КРИЗИСА ЗАКРУЧЕННОГО ТЕЧЕНИЯ

Доклад посвящен вопросам описания физической природы вихревого эффекта и рассмотрению аналогии механизмов энергоразделения, проявляющихся в природных явлениях и технических устройствах.

Вихревой эффект или эффект энергоразделения в закрученном потоке сжимаемого газа – природный феномен, впервые обнаруженный французским инженером Жозефом Ранком в конце 1920-х годов, и не получивший должного объяснения до нашего времени. Суть этого эффекта можно представить на примере упрощенной схемы вихревой трубы Ранка-Хилша, показанной на рис. 1.

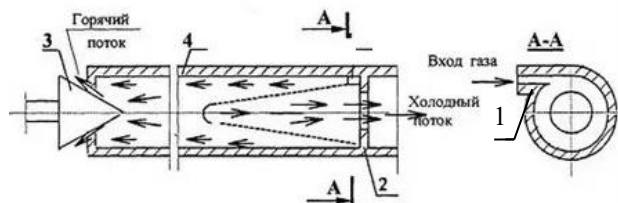


Рис. 1. Схема вихревой трубы с направлением движения закрученного потока при температурной стратификации газа

При вводе сжатого газа через улиточное устройство 1 в области 2 тангенциального входа потока в вихревую трубу 4 течение газа подвергается действию двух физических явлений – адиабатическому расширению с одновременным переходом к спирально-винтовому движению вдоль оси трубы и 2-ому явлению – кризису закрученного потока [1], характеризующему формированием области реверсивного (возвратного) закрученного течения.

Эффективность технических устройств, основанных на применении различных образом модифицированных трубок Ранка-Хилша, в которых предусмотрен отвод горячего потока через открытый торцевой конец трубки с регулирующим дроссельным устройством 3 или без него, определяется по доле расхода холодного газа, вытекающего противотоком с другого конца вихревой трубки [2].

В природе вихревой эффект может сопровождать многие явления, происходящие в атмосфере и океанах при землетрясениях, развитии тропических циклонов, тайфунов и ураганов. Но наиболее ярко эффект энергоразделения проявляется при формировании торнадо – разрушительных вихрей, диаметр которых у поверхности земли редко превышает несколько сотен метров, а над поверхностью воды может быть 5-30 м.



Рис. 2. Торнадо: а) – на начальной стадии при потере устойчивости материнского вихреобразования; б) – при формировании устойчивой структуры с образованием спирально-вихревого жгута

На рис. 2 представлены примеры торнадо на разной стадии его формирования. Анализ наблюдаемых последствий воздействия торнадо на окружающую среду показывает, что его разрушительная сила связана не только со сложной топологией материнского облака и малоизученными процессами аккумуляции энергии в нём, но и вихревой структурой центрального жгута, образованного системой спиральных вихревых нитей, совершающих восходяще-нисходящее реверсивное движение при вращении вокруг центральной оси. При этом в большом количестве случаев фиксируется выпадение града с размером градин от нескольких миллиметров до 30 см. Эти факты напрямую указывают на действие вихревого эффекта энергоразделения в торнадо, а сложное спирально-вихревое движение – на аналогию с движением газа в вихревой трубе.

Список литературы

1. Новиков И.И. Термодинамика. — Москва: Машиностроение, 1984. — 592 с.
2. Меркулов А. П. Вихревой эффект и его применение в технике.- Самара: Оптима, 1997. - 184 с.

O.V. Mitrofanova^{1,2}

¹ National Research Nuclear University MEPhI, Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe sh 31

² National Research Center "Kurchatov Institute", Russia, 123182 Moscow, Akademika Kurchatova pl., 1

THE VORTEX EFFECT IN NATURE AND TECHNOLOGY DURING THE IMPLEMENTATION OF THE SWIRL FLOW CRISIS

АНАЛОГИЯ РЕЙНОЛЬДСА ДЛЯ КИПЯЩИХ ПОТОКОВ НЕДОГРЕТОЙ ЖИДКОСТИ

Гидродинамическая теория теплообмена, основанная на идее Рейнольдса о существовании единого механизма переноса теплоты и количества движения в турбулентных потоках, позволяет на уровне наглядных физических представлений объяснить физику процессов переноса и получить удобные для практических расчетов формулы. Преимуществом данного подхода является тот факт, что в отличие от более строгих методов, использование аналогии Рейнольдса не требует детального знания законов турбулентного переноса во всей области течения жидкости. Это делает аналогию Рейнольдса наиболее удобным и гибким инструментом теоретического исследования процессов турбулентного переноса в двухфазных потоках

Для течений с «двойной неравновесностью» (перегретая жидкость вблизи стенки – недогретая жидкость в ядре потока), характерной для кипения недогретой жидкости в условиях вынужденного движения, аналогия Рейнольдса является естественным методом описания, позволяющим строго решить целый ряд задач физики поверхностного кипения.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что при движении пузырьковой двухфазной смеси в каналах, при одинаковых внешних параметрах (скорости, истинного объемного газосодержания и геометрии канала) могут возникать различные режимы течения, отличающиеся гидродинамическими и теплообменными характеристиками. При этом оказывается возможным выделить два предельных случая: *sliding bubble flow* и *coring bubble flow*. Используя физические представления о механизме формирования этих предельных режимов пузырькового течения, оказалось возможным на классическом уровне построить замкнутую теоретическую модель таких течений, позволяющую определить как профили скорости, так и величины гидродинамического сопротивления, практически избежав при этом необходимости во введении подбираемых по опытным данным эмпирических коэффициентов.

Достаточно глубокое понимание гидродинамики пузырьковых течений с привлечением полученных соотношений для аналогии Рейнольдса, позволяет строго решить целый ряд задач физики поверхностного кипения: о мак-

симальном размере пристеночных пузырей, потерях давления при пузырьковом поверхностном кипении.

Аналогичный подход позволяет решить задачи о кризисе теплообмена, а также о теплоотдаче и гидравлическом сопротивлении при пленочном кипении недогретой жидкости в вынужденном потоке (закризисный теплообмен), и получить при этом хорошее согласие с экспериментом.

Теоретическое исследование пленочного кипения показало, что при определенных условиях этот метод охлаждения позволяет без повреждения теплоотдающей поверхности отводить тепловые потоки, превышающие 100 МВт/м².

Проведенный анализ создает основу для построения теоретического решения весьма актуальной задачи о паросодержании и гидравлическом сопротивлении при пузырьковом кипении недогретой жидкости в каналах. Такая комплексная модель, разработанная (Avdeev and Pehterev 1986, 1987), без какой-либо коррекции впервые позволила описать не только беспрецедентно широкий массив опытных данных, полученных при кипении в круглых трубах, но и такие экзотические случаи, как кипение в каналах с различными законами обогрева (линейно-возрастающим, линейно-убывающим, ступенчатым), а также в каналах сложной формы, включая обогреваемые стержневые сборки.

Проведенный анализ создает основу для построения теоретического решения весьма актуальной задачи о паросодержании и гидравлическом сопротивлении при пузырьковом кипении недогретой жидкости в каналах.

Список литературы

1. Avdeev A.A. Bubble Flows// Springer International Publishing Switzerland, 2016. 466 p.
2. Авдеев А.А. Аналогия Рейнольдса для неразвитого кипения недогретой жидкости в потоке// Теплоэнергетика, 1982. - № 3 - С. 23-26
3. Авдеев А.А. Приложение аналогии Рейнольдса для исследования поверхностного кипения в условиях вынужденного движения// ТВТ, 1986. - Т. 24 (1) – С. 111 -119.
4. Авдеев А.А. Теплообмен и гидравлическое сопротивление при пленочном кипении недогретой жидкости в каналах// Теплоэнергетика, 1986. - № 4 – С. 39 – 46.
5. Авдеев А.А. Гидродинамика турбулентных течений пузырьковой двухфазной смеси// ТВТ, 1983. - Т.21(4) – С. 707 -715.

A.A.Avdeev.¹, S. M. Yudin^{1,2}

¹ Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, ²National Research University MPEI
Izhorskaya st. 13 Bd.2, Moscow, Russia 125412

REYNOLDS ANALOGY FOR SUBCOOLED FLOW BOILING

Б.В. Кичатов, А.М. Корицунов

Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН
Россия, 19991, г. Москва, ул. Косыгина, д.4

ХИМИЧЕСКИЙ МАГНЕТИЗМ КАК ПОВЕРХНОСТНАЯ СИЛА ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МОТОРОВ

Моторы это устройства, которые способны преобразовывать различные формы энергии в кинетическую энергию своего движения. Важную роль при перемещении моторов могут играть поверхностные силы. Одним из видов поверхностных сил является сила химического магнетизма [1,2]. Если при протекании окислительно-восстановительных реакций на поверхности биметаллического пловца возникает петля с током, то на неё в неоднородном магнитном поле действует сила. Природа этой силы которой никак не связана с магнитными свойствами материала из которого изготовлен пловец, а определяется действием силы Лоренца на подвижные заряды в магнитном поле. Если в состав биметаллического пловца входят ферромагнитные металлы, то него в неоднородном магнитном поле также действует магнитная сила. Результаты исследования показывают, что в зависимости от взаимного направления магнитной силы и силы химического магнетизма, химические реакции могут способствовать как ускорению, так и торможению пловца в неоднородном магнитном поле. Посредством изменения концентрации и типа электролита, типа металлов из которых изготовлен пловец, а также pH раствора можно управлять ориентацией и скоростью движения пловца. Эти результаты открывают новые возможности для прямого преобразования химической энергии “топлива” в кинетическую энергию подвижных моторов.

Список литературы

1. B. Kichatov, A. Korshunov, V. Sudakov, A. Golubkov, V. Gubernov, A. Kiverin, Motion of a chemically reactive bimetal motor in a magnetic field, Phys. Chem. Chem. Phys., 2022, 24, 19693-19696.
2. B. Kichatov, A. Korshunov, V. Sudakov, Chemical magnetism - surface force to move motors, Phys. Chem. Chem. Phys., 26(37) (2024) 24542-24552.

B.V. Kichatov, A.M. Korshunov

N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics RAS
Russia, 19991, Moscow, Kosygin st., 4

CHEMICAL MAGNETISM AS A SURFACE FORCE FOR MOVING MOTORS

Н.В. Васильев^{1,2}

¹Объединенный институт высоких температур РАН,
Россия, 125412, Москва, Ижорская, 13/2

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

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ НЕДОГРЕТОЙ ЖИДКОСТИ

В докладе представлены результаты цикла многолетних комплексных исследований кипения недогретой жидкости, проведенных в лаборатории теплообмена в энергетических установках ОИВТ РАН. Данная технология позволяет отводить предельно высокие плотности тепловых потоков в элементах магнитогидродинамических генераторов, кипящих атомных и термоядерных реакторов, суперкомпьютеров [1, 2].

С использованием современных измерительных средств и оригинальных экспериментальных методик детально исследованы такие статистические характеристики процесса кипения недогретой воды, как распределение и устойчивость центров парообразования, плотность центров на единицу площади греющей поверхности, распределение пузырей по размерам, частота возникновения пузырей, длительность фаз жизни и эволюция формы пузырей в условиях кипения на гладких и искусственно структурированных типах греющих поверхностей в широком диапазоне плотностей тепловых потоков и недогревов до температуры насыщения. По результатам проведенного экспериментального исследования в сочетании с численным моделированием предложена модифицированная феноменологическая модель процесса кипения недогретой жидкости [3]. Показано увеличение теплоотдачи при кипении недогретой воды в канале и насыщенной в большом объеме на поверхности с покрытием, образованным методом микродугового оксидирования, по сравнению с гладкой поверхностью в среднем на 30%. Экспериментально обоснована возможность применения кипения недогретых диэлектрических жидкостей при вынужденном течении в системах охлаждения электронной техники.

Определены и детализированы последовательность процессов и механизмы, ведущие к наступлению кризиса кипения недогретой жидкости [4]. Обнаружено, что наступлению кризиса кипения недогретой жидкости в канале предшествует кардинальное изменение структуры течения – появление в потоке жидкости крупных паровых агломератов, что несет в себе угрозу гидравлической разверки многоканальной системы охлаждения. Показана

возможность накопления при кипении недогретой жидкости неконденсирующегося газа у греющей поверхности, вызывающего существенное снижение критических тепловых нагрузок.

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

Список литературы

1. Васильев Н.В., Зейгарник Ю.А., Ходаков К.А. Кипение при вынужденном течении недогретой жидкости как метод отвода высоких тепловых потоков (обзор). Ч. 1. Характеристики, механизм и модель процесса, теплоотдача и гидравлическое сопротивление // Теплоэнергетика. 2022. № 4. С. 3–21.
2. Васильев Н.В., Зейгарник Ю.А., Ходаков К.А. Кипение при вынужденном течении недогретой жидкости как метод отвода высоких тепловых потоков (обзор). Ч. 2. Критические тепловые потоки, интенсификация теплоотдачи // Теплоэнергетика. 2022. № 5. С. 3–17.
3. Васильев Н.В., Зейгарник Ю.А., Вавилов С.Н. Модификация феноменологической модели кипения недогретой жидкости // Теплоэнергетика. 2023. № 2. С. 90–94.
4. Васильев Н.В., Зейгарник Ю.А., Ходаков К.А., Вавилов С.Н. Паровые агломераты и сухие пятна как предвестники кризиса кипения недогретой жидкости в канале // Теплофизика высоких температур. 2021. Т. 59. № 3. С. 373–383.

N. V. Vasil'ev^{1,2}

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

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

STUDY OF MECHANISMS OF HIGH-INTENSITY HEAT TRANSFER PROCESSES DURING SUBCOOLED LIQUID BOILING

*В.И. Терехов, М.А. Пахомов*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Россия,
630090, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

ТЕПЛОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИСТЕННЫХ ГАЗОКАПЕЛЬНЫХ ЗАВЕС. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

Повышение температуры газа перед турбиной является одним из основных способов роста тепловой эффективности энергетических установок. К настоящему времени в авиационных двигателях эта величина уже превышает значение 2200 К и имеет тенденцию к дальнейшему росту. Это уже существенно превышает рабочие температуры используемых конструкционных металлов, сплавов на их основе и различных композитов.

Поэтому проблема охлаждения рабочих поверхностей энергетических установок от воздействия высокоскоростного основного потока газа приобретает особую актуальность. Среди относительно технологически простых способов повышения эффективности охлаждения наибольший положительный эффект является подача охладителя через круглые наклонные отверстия различной формы. Теория однофазных завес как при относительно простых, так и сложных динамических условиях развивающейся вдоль не - и адиабатических поверхностей к настоящему времени является хорошо разработанной и ее основы изложены в монографиях [1–3] и в обобщающих обзорах [4–7].

Другим методом, позволяющим получить существенное повышение тепловой защиты стенки, является использование двухфазного газокapельного охладителя. Первые работы в данном направлении были выполнены в [8–10]. В этих работах показано, что применение распыленных капель жидкости в пристенном слое газовой завесы приводит к существенному улучшению условий защиты рабочей поверхности за счет использования скрытой теплоты фазового перехода при испарении мелкодисперсных капель в непосредственной близости от стенки. Далее в серии работ авторов выполнено численное [11–16] и экспериментальное [9,10,13] исследования при дуде газокapельной пристенной завесы вдоль защищаемой поверхности.

В настоящей работе рассмотрен широкий спектр проблем двухфазного охлаждения с анализом как современного состояния исследований, так и новых задач, направленных на совершенствование систем тепловой защиты с помощью двухфазных газокapельных пристенных завес.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования (номер соглашения 075-15-2024-620).

Список литературы

1. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энергоатомиздат. 1985. 320 с.
2. Волчков Э.П. Пристенные газовые завесы. Новосибирск: Наука, 1983. 240 с.
3. Han J.C., Dutta S., Ekkad S. Gas turbine heat transfer and cooling technology. CRC Press. Taylor and Francis Group, Boca Raton, FL, U.S.A., 2012.
4. Goldstein R.J. Film cooling // Adv. Heat Transfer, 1971. - V. 7. - P. 321–378.
5. Волчков Э.П., Лебедев В.П., Терехов В.И. Теплообмен в турбулентных пристенных струйных течениях // Теплофизика и аэромеханика, 1997. - Т. 4, - № 2. - С. 195–210.
6. Bunker R.S. A review of shaped hole turbine film cooling technology // ASME J. Heat Transfer, 2005. - V. 127. - P. 441–453.
7. Zhang J.Z., Zhang S.C., Wang C.H., Tan X.M. Recent advances in film cooling enhancement: A review // Chinese J. Aeronautics, 2020. - V. 33(4). - P. 1119–1136.
8. Васильев А.А., Репухов В.М. К расчету двухфазной тепловой завесы на адиабатической стенке // Промышленная теплотехника, 1981. - Т. 3. - № 6. - С. 12–19.
9. Волчков Э.П., Лебедев В.П., Терехов В.И., Шишкин Н.Е. Экспериментальное исследование влияния концентрации мелкодисперсных капель жидкости на эффективность газовой завесы // Сиб. физ.-техн. журн., 1992. - Вып. 1. - С. 28–32.
10. Терехов В.И., Шаров К.А., Шишкин Н.Е. Экспериментальное исследование смешения газового потока с пристенной газокapельной струей // Т. и А., 1999. - Т. 6. - № 3. - С. 331–340.
11. Терехов В.И., Пахомов М.А. Численное исследование тепловой эффективности двухфазной газокapельной пристенной завесы в цилиндрическом канале // ТБТ. 2002. - № 4. - С. 633–640.
12. Terekhov V.I., Pakhomov M.A. The thermal efficiency of near-wall gas-droplets screens. I. Numerical modeling // Int. J. Heat Mass Transfer. 2005. - V. 48. - P. 1747–1759.
13. Terekhov V.I., Pakhomov M.A., Sharov K.A., Shishkin N.E. The thermal efficiency of near-wall gas-droplets screens. II. Experimental study and comparison with numerical results // Int. J. Heat Mass Transfer. 2005. - V. 48. - P. 1760–1771.
14. Терехов В.И., Пахомов М.А. Численное исследование пристенной газокapельной струи в канале при наличии теплового потока на поверхности // ПМТФ. 2006. - Т. 47. - № 1. - С. 5–17.
15. Terekhov V.I., Pakhomov M.A. Film-cooling enhancement of the mist vertical wall jet on the cylindrical channel surface with heat transfer // ASME J. Heat Transfer. 2009. - V. 131(6). 062201.
16. Пахомов М.А., Терехов В.И. Структура пристенной газокapельной завесы, вдуваемой через круглые отверстия в поперечную траншею. Сравнение эйлерова и лагранжева подходов // Т. и А., 2020. - Т. 27. - № 3. - С. 423–432.

V.I. Terekhov, M.A. Pakhomov

S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Russia,
630090, Novosibirsk, Lavrentieva Ave., 1

FILM COOLING EFFICIENCY OF DROPLET-LADEN NEAR - WALL JETS. THE STATE-OF-THE-ART

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК КОМПЛЕКСНОГО ПРОЦЕССА ВЫВОДА ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ АЭС

Вводные замечания. Доклад демонстрирует применение цифровых технологий для решения актуальных проблем массового вывода атомных станций из эксплуатации и ликвидации их ядерного наследия на индустриальной основе.

Актуальность задачи применения цифровых технологий для обеспечения эффективности и управления качеством работ по выводу из эксплуатации (ВЭ) АЭС с соблюдением действующих норм радиационной и ядерной, промышленной безопасности определяется тем, что в ближайшее десятилетие более 150 энергоблоков атомных станций в мире окончательно выработают свой ресурс и должны быть ликвидированы. Итог ликвидации АЭС - формируются необходимые условия, позволяющие снять ограничения надзорных органов с территории АЭС и допустить возможность неограниченного ее использования.

Метод решения задачи. Высокая сложность технологических процессов ВЭ и ликвидации энергоблоков АЭС, постоянно повышающаяся динамика работ, огромное количество факторов, влияющих на их качество, а также значительные убытки при отказе от оптимизации параметров технологического процесса демонтажа и утилизации конструктивных компонентов энергоблока, определяет перспективный путь решения этой задачи путем имитационного моделирования различных вариантов выполнения практических работ. Применение методов «цифрового производства» для оптимизации работ по ВЭ АЭС является основным методом решения поставленной задачи на базе уже апробированных компьютерных систем; CAD/CAM (Computer Aided Design/Manufacturing), CAE (Computer Aided Engineering), CAPP (Computer Aided Process Planning), SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition), DCS (Distributed Control System) и MES/MOM (Manufacturing Execution System/Manufacturing Operation Management) и ряда других.

Построение цифровой модели ВЭ АЭС. Пример решения задачи. Для построения цифрового двойника применяются принципы: открытая архитектура и модульность; документированной процесс мониторинга качества для любых периодов ВЭ АЭС; достаточности, сбалансированных интегральных показателей; системного планирования; превентивного предупреждения угроз и рисков; раскрытия качества решений. Информационная

составляющая двойника включает: инструменты мониторинга, характеризующихся параметрами: глубина диагностики; интенсивность обнаружения скрытых отказов; восстановление работоспособного состояния элементов АСУ ТП, а также коррекции и улучшений; алгоритмы анализа по критериям качества технического решения; алгоритмы выявления достижений и ошибок (на базе диаграммы Исикавы, Парето и пр.); методы адаптации модели на основе фактических данных демонтажных работ и утилизации отходов при ликвидации АЭС. Производственная система цифрового двойника — это совокупность технологических компонентов АЭС; основные технологические процессы - дезактивация, демонтаж и утилизации оборудования и конструкций АЭС; вспомогательные процессы подготовка и работа оборудования, транспортных линий, обеспечение ресурсов безопасности, качества; цифровая информация в рамках заявленной цели всего процесса ВЭ АЭС. При создании модели цифрового двойника комплексного процесса ВЭ АЭС в зависимости от конечной цели имитационного моделирования, в частности цели - системного прогнозирования рисков для окружающей среды от принимаемых к исполнению технических решений, выбора лучшего решения и т.д., интегральный процесс моделируется на трех уровнях дифференцированной детализации: отдельной технологической операции; самостоятельного технологического процесса; интегрального производственного процесса на промышленной основе. На рис. показана схема уровней моделирования цифрового двойника.

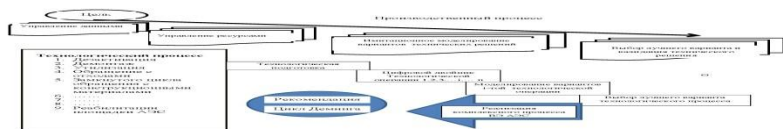


Рис. Схема моделирования ВЭ АЭС.

Выводы АЭС являются объектами длительной эксплуатации, задача обеспечения требуемого уровня их безопасности, является первостепенной для всех этапов их жизненного цикла. Для ее успешной реализации этой задачи необходимо достичь оптимального соотношения между требуемым уровнем надежности, безаварийности сложных технических систем АЭС с одной стороны и минимумом эксплуатационных затрат с другой. Для этого предложен информационный цифровой двойник для имитационном моделировании возможных событий и отказов в рамках интегрального технологического процесса ВЭ АЭС для периода демонтажа и окончательной ликвидации энергоблока.

.N.N.Safronova¹

¹ Association of Organizations of the Construction Complex of the Nuclear Industry
ul. Obrucheva, 30/1 building 1, Moscow, 117485

DIGITAL PROCESS DECOMMISSIONING NPP

А.П. Сорокин

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации –
Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского»,
Россия, 249033, Обнинск, Калужская обл., пл. Бондаренко, 1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В СИСТЕМЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ТВС В КОНТУРЕ С ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ

Активная зона реакторов на быстрых нейтронах является системой гидравлически связанных параллельных каналов (ТВС). Результаты теплогидравлических исследований для водоохлаждаемым реакторам указывают на более сложные процессы гидродинамики и теплообмена при кипении теплоносителя в системе параллельных каналов по сравнению с одиночными каналами. Вместе с тем, процессы теплообмена и устойчивость циркуляции при кипении жидкого металла в системе параллельных ТВС активной зоны быстрых реакторов с малыми скоростями теплоносителя слабо исследованы.

В докладе представлены результаты экспериментального и численного моделирования теплообмена и межканальной неустойчивости при кипении жидкого металла в контуре с системой параллельных ТВС при естественной конвекции применительно к аварийным режимам реакторов на быстрых нейтронах БН-600/БН-800 [1–4]. Приведены описание высокотемпературной экспериментальной установки, включающей подъемные участки с модельными ТВС имитаторов твэлов при общем опускном участке с холодильником, методики и вопросов моделирования экспериментов. Изложены результаты экспериментальных исследований теплогидравлики при кипении эвтектического натрий-калиевого сплава в одиночных и системе двух параллельных ТВС в контуре с естественной циркуляцией.

Численное моделирование процесса кипения жидкого металла в одиночной и системе параллельных ТВС осуществляется в многомерном поканальном приближении в рамках двухжидкостной модели двухфазного потока жидкого металла при равных давлениях в паровой и жидкой фазах. Приведено описание расчетной модели и кода SAT и результаты валидации.

Представлены результаты экспериментальных и расчетных исследований полей скорости (расхода) теплоносителя в ТВС и системе параллельных ТВС при кипении теплоносителя в аварийных режимах с естественной конвекцией, а также данные по теплоотдаче и картограмме режимов течения двухфазного потока в ТВС. Показано, что переход от пузырькового режима к снарядному режиму характеризуется колебаниями расхода и других тепло-

гидравлических параметров с высокой амплитудой с периодом от 20 до 40 с, на которые накладываются колебания с периодом от 150 до 200 с, а также колебания с малой амплитудой и периодом 3-5 с. Возникновение колебательного процесса при кипении теплоносителя в одной из ТВС приводит к противофазному колебательному процессу в другой ТВС, в дальнейшем колебания параметров в разных ТВС носят противофазный характер. Гидродинамическое взаимодействие контуров приводит к значительному увеличению амплитуды колебаний расхода теплоносителя ("резонанс" пульсаций расхода) и возможному "запиранию" или инверсии расхода теплоносителя в контурах, к росту температуры теплоносителя и оболочки имитаторов твэлов (эффект межканальной неустойчивости) и возникновению кризиса теплообмена. Для развитого снарядного режима кипения при плотности теплового потока свыше 100 кВт/м^2 возникновение и развитие межканальной неустойчивости теплоносителя может привести к кризису теплообмена.

Картограмма режимов течения двухфазного потока для контуров с одноканальными ТВС может быть использована для идентификации режимов течения двухфазных потоков жидкого металла в контурах с системой ТВС.

Список литературы

1. Ефанов А.Д., Сорокин А.П., Иванов Е.Ф., Богословская Г.П., Колесник В.П., Марцинюк С.С., Мальков В.Л., Сорокин Г.А., Рымкевич К.С. Исследования теплообмена и устойчивости кипения жидкометаллического теплоносителя в контуре естественной циркуляции // Теплоэнергетика. – 2003. – № 3. – С. 20-26.
2. Sorokin G., Ninokata H., Sorokin A., Endo H. Numerical Modelling of Liquid Metal Boiling in Parallel Channels under Natural Circulation Conditions // Proceeding "Hydrodynamics and Heat Transfer in Single and Two Phase Flow of Liquid Metals". 11-th International Meeting of the IAEN Working Group on Advanced Nuclear Reactors Thermal Hydraulics, 5-9 July 2004. Obninsk: SSC RF – IPPE, 2005.
3. Ефанов А.Д., Сорокин А.П., Иванов Е.Ф., Богословская Г.П., Иванов В.В., Волков А.Д., Сорокин Г.А., Зуева И.Р. Теплообмен при кипении жидких металлов в системе каналов в режиме естественной циркуляции // Теплоэнергетика. – 2007. – № 3. – С. 43–51.
- 4 Сорокин А.П., Кузина Ю.А., Иванов Е.Ф. Особенности теплообмена при кипении жидкого металла в аварийных режимах в ТВС быстрых реакторов // Атомная энергия. – 2019. – Т. 126. – Вып. 2. – С. 69–78.

A.P. Sorokin

State Scientific Center of the Russian Federation – Leypunsky Institute of Physics
and Power Engineering, Joint Stock Company,
Russia, 249033, Obninsk, Raluga region, Bondarenko sq., 1

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL MODELING OF HEAT TRANSFER DURING LIQUID METAL BOILING IN A SYSTEM OF PARALLEL FUEL ASSEMBLY UNDER NATURAL CIRCULATION

СЕКЦИЯ 1

Фундаментальные проблемы тепло- и массообмена при однофазной конвекции

ТЕМПЕРАТУРНАЯ СТРАТИФИКАЦИЯ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ ГАЗА В ТОНКОСТЕННОЙ ЕМКОСТИ ПРИ БОЛЬШИХ НЕОДНОРОДНОСТЯХ ТЕМПЕРАТУРЫ

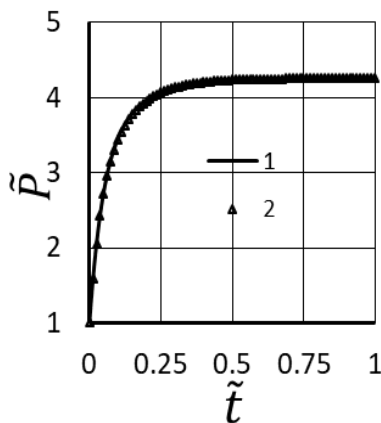


Рис. 1. Давление: 1 – 2D;
2 – упрощенное уравнение

Свободно-конвективный тепломассоперенос при наличии существенных неоднородностей температуры и плотности исследован существенно менее подробно, чем случай естественной конвекции слабосжимаемой жидкости, описываемый уравнениями Буссинеска [1]. Одним из практически значимых примеров, в котором наблюдаются подобные сжимаемые течения, являются паровые подушки криогенных емкостей. При этом, аналогично жидкости, в заполненном газом объеме также выявлена возможность формирования температурной стратификации [2]. В случае конвекции в заполненном газом

стратифицированном по температуре объеме, аналогично жидкости [3], была продемонстрирована возможность реализации режима локальной автомодельности пограничного слоя и предложено упрощенное одномерное уравнение для температуры [4]. Кроме того, в случае стационарной сжимаемой конвекции в работе [5] было экспериментально показано, что параметры теплообмена при больших неоднородностях температуры на турбулентных режимах зависят от параметров течения аналогичным слабосжимаемой жидкости образом.

В данной работе в качестве дальнейшего развития [4] рассмотрены вопросы влияния перетоков тепла по стенке емкости на параметры теплообмена и стратификацию. Предложено упрощенное одномерное соотношение для описания сопряженной стратификации, по форме близкое к уравнению теплопроводности. Проведена его верификация путем сравнения результатов решения одномерного уравнения с данными моделирования полных уравнений Навье-Стокса в приближении малых чисел Маха (Рис. 1).

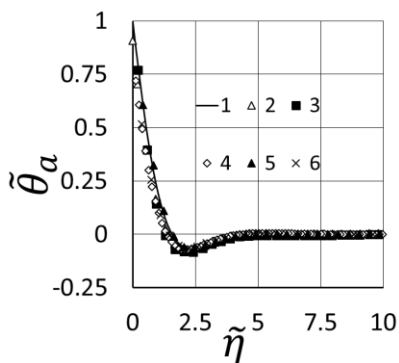


Рис. 2. Автомоделные профили (1) и 2D решения (2-6)

Продемонстрирована возможность реализации режима локальной автомодельности (Рис. 2).

Выполнен теоретический анализ теплообменных процессов при формировании стратификации в тонкостенной емкости от однородных начальных условий. Показаны основные стадии формирования стратификации: режим однородного разогрева, когда в основной части емкости температура определяется поршневым эффектом, а пристенный теплообмен зависит от диффузионного механизма переноса; режим развития свободной конвекции, когда в области вертикальных стенок и верхней части емкости тепломассоперенос определяется

сильно нестационарным конвективным течением, способствующим формированию стратификации; режим локальной автомодельности и стратифицированного тепломассопереноса, когда во всем объеме емкости наблюдается вертикальное температурное расслоение при минимальных перепадах температуры в направлениях, перпендикулярных вектору силы тяжести, а перенос тепла хорошо описывается предложенным упрощенным одномерным уравнением. Полученные результаты предлагается использовать при создании упрощенных динамических моделей тепломассопереноса в криогенных емкостях для расчета параметров паровой подушки.

Список литературы:

1. **Gray D.D., Giorgini A.** The validity of the Boussinesq approximation for liquids and gases // Int. J. Heat Mass Transfer. 1976. V. 19. P. 545.
2. **Van Dresar N.T., Lin C.S., Hasan M.M.** Self pressurization of a flightweight liquid hydrogen tank: Effect of fill level at low wall heat flux // AIAA Paper-92-0818. 1992.
3. **Ананьев А.В., Миронов В.В., Моисеева Л.А., Черкасов С.Г.** Анизотропное влияние естественной конвекции на температурное поле в емкости при наличии устойчивой температурной стратификации // Изв. РАН. МЖГ. 2015. № 5. С. 96.
4. **Городнов А. О.** Исследование температурной стратификации при естественной конвекции газа в замкнутом объеме // ТВТ, 2024, том 62, выпуск 3, С. 383–393
5. **Hattori Y., Toshihiro T., Nagano Y., Tanaka N.** Turbulent characteristics of natural-convection boundary layer in air along a vertical plate heated at high temperatures // Int. J. Heat and Fluid Flow, 2006, vol. 27, pp. 445-455.

A.O. Gorodnov¹, I.V. Laptev¹, S.G. Cherkaasov¹

¹ Keldysh Research Centre, Moscow, Russia

LARGE TEMPERATURE DIFFERENCE NATURAL CONVECTIVE TEMPERATURE STRATIFICATION IN A THIN-WALLED VESSEL

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЕНТИЛЯЦИИ ПРИ МНОГОСТРУЙНОЙ ПОДАЧЕ ПРИТОЧНОГО ВОЗДУХА

В докладе представляются результаты численного моделирования турбулентного течения и массообмена в вентилируемом помещении. В соответствии с геометрией модельного эксперимента, где изучалось распространение красителя из точечного источника в заполненной водой модели атриума [1], помещение представляет собой прямоугольный параллелепипед со скошенной верхней гранью, на которой расположены пять входных отверстий высотой $h_0 = 0.1$ м и шириной $4h_0$ (рис. 1а, б). Высота помещения составляет $H_1 = 30h_0$, длина $L = 38h_0$, ширина $W_1 = 24h_0$. Ширина потолка составляет $W_2 = 18.5h_0$, скошенной грани – $W_3 = 7.5h_0$. На одной из торцевых стенок размещено протяженное выходное отверстие (рис. 1б), размеры которого составляют $3.5h_0 \times 24.7h_0$. Объем атриума составляет 26.8 м^3 .

В экспериментах [1] были задействованы все пять входов, в настоящей работе число активных приточных отверстий варьировалось от одного до пяти (соответственно изменялся общий расход приточного воздуха). В каждом активном входном сечении задавалось равномерное распределение скорости $V_0 = 0.327 \text{ м/с}$, что соответствовало принятому в экспериментах на воде значению $Re = V_0 h_0 / \nu = 2.2 \times 10^3$. На поверхности выходного сечения задавалось постоянное нормированное давление. Углекислый газ в количестве 1.15 кг/день выделялся в локализованном источнике (сфера объемом до 10^{-2} м^3), положение источника в помещении варьировалось.

Моделирование турбулентности проводилось на основе LES-подхода (подсеточная модель Смагоринского) и на основе URANS-подхода ($k-\omega$ SST модель турбулентности). Расчеты проводились в пакете ANSYS Fluent с использованием ресурсов СКЦ «Политехнический» (scc.spbstu.ru). Использовались сетки с гексагональными элементами: число ячеек для URANS расчетов составляло 6 млн, для LES – 38 млн. Для получения осредненных величин накапливалась статистика протяженностью до 100 периодов колебаний.

Показано, что в зависимости от числа приточных струй в помещении могут реализовываться разные режимы течения: струи могут сливаться (все вместе или попарно), а могут распространяться по отдельности. Структура течения для всех рассчитанных вариантов носит сложный трехмерный характер. Мгновенная структура течения для варианта с пятью струями, полученная при обработке результатов LES расчетов, показана на рис. 1 а: струи сливаются в

центре помещения и совершают низкочастотные колебания. Наличие низкочастотных колебаний было выявлено в ходе URANS-расчетов и подтверждено обработкой LES данных. Значения числа Струхала в зависимости от варианта лежат в диапазоне от 0.02 до 0.06.

Анализируется влияние способа подачи приточного воздуха на эффективность вентиляции с точки зрения удаления вредных примесей, выделяющихся в помещении. Изоповерхности величины эффективности вентиляции, которая определяется как отношение концентрации примеси на выходе к среднему по объему значению концентрации, $\varepsilon_c = C_{out}/\langle C \rangle$, для двух вариантов сопоставлены на рис. 1в. Видно, что многоструйная подача воздуха в значительной мере повышает эффективность вентиляции, обеспечивая равномерное распределение воздуха с низким содержанием углекислого газа.

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ 24-19-00437.

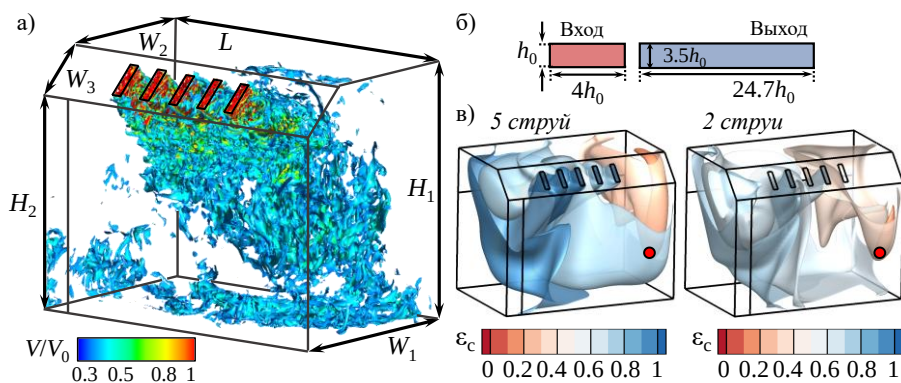


Рис. 1. а) Геометрия расчетной области и изоповерхность Q -критерия, окрашенная безразмерным модулем скорости, б) входное и выходное сечение, в) изоповерхности величины ε_c для двух вариантов подачи приточного воздуха

Список литературы

1. Thatcher T. L., Wilson D. J., Wood E. E., Craig M. J., Sextro R. G. Pollutant dispersion in a large indoor space: Part 1 – scaled experiments using a water-filled model with occupants and furniture // Indoor air, 2004. – Vol. 10. – P. 258-271

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

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

ANALYSIS OF VENTILATION EFFECTIVENESS WITH MULTI-JET AIR SUPPLY

В.И. Шалаев¹, С.Т. Калугин¹, Г. В. Толоко¹

¹ Московский физико-технический институт,
Россия, 141701, Долгопрудный, Институтский пер., 9

ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОС В СДВИГОВЫХ ТЕЧЕНИЯХ СЖИМАЕМОГО ГАЗА

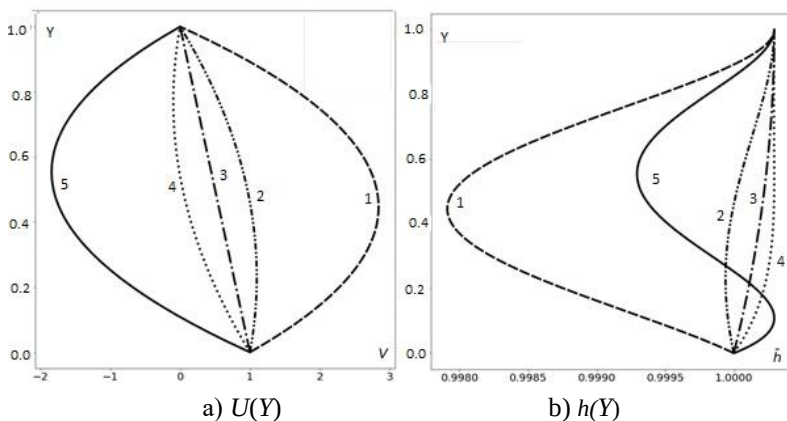
На основе приближения Стокса изучены течения сжимаемого газа в плоских и цилиндрических каналах, генерируемые движением границ, постоянными продольным градиентом давления и поперечным массопереносом при заданных температурах поверхностей, а также с теплоизолированной неподвижной стенкой. Получены в аналитической форме интегралы уравнения энергии для энтальпии, как функции продольной скорости при различных числах Прандтля. На этой основе решения нелинейного уравнения импульса представлены в виде интеграла от вязкости по скорости, связанного равенством с явной функцией от поперечной координаты.

Для несжимаемой среды подобные течения (Куэтта-Пуазейля) хорошо изучены. Для сжимаемого газа решение получено только для течения Куэтта [1]. Приближение Стокса для рассмотренных в настоящей работе задач является главным при небольших значениях параметра массопереноса и градиента давления, целом эти задачи описываются полными уравнениями Навье-Стокса.

Течение типа Куэтта с поперечным массопереносом ранее не рассматривалось. Для него получены новые интегралы для безразмерной энтальпии $h(U) = \beta R(U+A)$, где β – параметр, $R(U+A)$ – полином, зависящий от числа Прандтля и включающий логарифмическую функцию при $Pr = 2$; U – безразмерная скорость газа, A – постоянная интегрирования уравнения импульса. Решения уравнения импульса в этом случае имеют форму интеграла от безразмерной вязкости $m(U+A)$ по аргументу, который равен функции $K(Y)$, где Y – безразмерная поперечная координата, которая имеет разный вид для плоского и цилиндрического течений. Для формулы Сазерленда явный вид интеграла вязкости возможен только для $Pr = 1$, в остальных случаях он определяется численно. При линейной зависимости вязкости от температура эти интегралы при всех значениях числа Прандтля определяются аналитическими функциями.

Для течения Куэтта-Пуазейля в газа интеграл для энтальпии существует только при теплоизолированной неподвижной стенке и имеет простой вид при произвольном числе Прандтля: $R(U) = a - U^2$, где a – параметр, определяемый краевыми условиями уравнения энергии. Интеграл уравнения

импульса в этом случае представляется в достаточно простой аналитической форме. Правая часть проинтегрированного уравнения импульса $K(Y)$ в этом случае содержит дополнительный квадратичный по Y член, пропорциональный градиенту давления. На Рис. 1 представлены распределения безразмерных скорости и температур в таком течении при различных значениях безразмерного градиента давления.



$P =$: 1 - -0.787, 2 - -0.157, 3 - 0.0, 4 - 0.157, 5 - 0.787.

Рис. 1. Распределения безразмерных скорости $U(Y)$ и энтальпии $h(Y)$ в течении Куэтта-Пуазейля в воздухе

Список литературы

1. Illingworth, C. R. Some solutions of equations of flow of a viscous compressible fluid. // Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. 1950. V. 46. N. 3. P. 469-487.
- 2 В.И. Шалаев, С.Т. Калугин, Г.В. Толоко, В.А Токарев. Плоскопараллельные течения и теплоперенос в газе // XXXIX Сибирский теплофизический семинар. Труды конференции. Новосибирск. 2023. С. 253-258.

V.I. Shalaev¹, S.T. Kalugin¹, G.V. Toloko¹

¹ Moscow Institute of Physics and Technology
Russia 141701, Dolgoprudny, 9 Institutsky ln.

HEAT AND MASS TRANSFER IN SHEAR COMPRESSIBLE GAS FLOWS

В.Р. Адиатуллин, С.А. Галаев, Н.Г. Иванов, В.В. Рис
 Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
 Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ ТЕЧЕНИЯ ВСТРЕЧНЫХ ПРИСТЕННЫХ СТРУЙ В ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПОЛОСТИ

Введение. Интенсивные автоколебания приточных струй могут способствовать интенсивному перемешиванию среды в ограниченном пространстве и, как следствие, снижению концентрации вредных примесей. Пример модельной вентиляционной конфигурации, в которой в силу проявления механизмов неустойчивости могут формироваться нестационарные режимы течения – подача встречных пристенных струй. Такое течение ранее численно исследовалось в [1] методом RANS ($Re = 5 \times 10^3$), с акцентом на нестационарные явления, вызванные плавным изменением расхода приточного воздуха. В настоящей работе проводится анализ развития автоколебательных режимов течения при стационарной подаче приточного воздуха при числах Рейнольдса порядка 10^2 .

Постановка задачи и метод решения. Как и в [1], струи воздуха поступают в полость, форма которой – прямоугольный параллелепипед высотой H , длиной $L = 3H$ и шириной $W = H$ (рис. 1). К полости присоединены входные каналы высотой $h_{in} = 0,056H$ и выходные каналы высотой $h_{out} = 0,16H$. Длина и ширина каждого канала равна H .

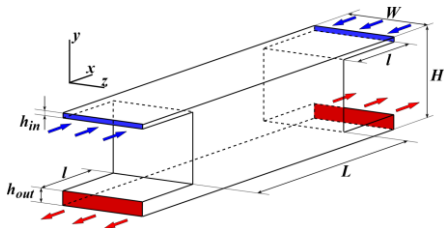


Рис. 1. Геометрическая модель и граничные условия

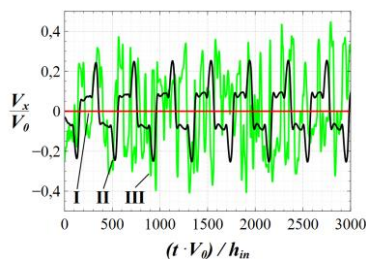


Рис. 2. Эволюция скорости в точке мониторинга при разных режимах течения

Режим течения определяется числом Рейнольдса в подводящих каналах $Re = \rho V_0 h_{in} / \mu$, где V_0 – среднерасходная скорость подачи воздуха. На входе в каналы (окрашенные синим сечения на рис. 1) задавалось равномерное распределение скорости, на выходе из каналов – давление.

Течение моделировалось с помощью программного пакета ANSYS Fluent путем численного решения нестационарных уравнений Навье-Стокса. В расчетах использовался решатель двойной точности (*pressure-based*), конвек-

тивные слагаемые дискретизировались по противопоточной схеме 2-го порядка. Продвижение по времени осуществлялось по схеме 2-го порядка с шагом $\Delta t = 0,15h_{in}/V_0$. Расчетная сетка содержала более 1 млн ячеек. Продолжительность выборки для осреднения составляла $2,4 \times 10^4 h_{in} / V_0$. Использовались ресурсы СКЦ «Политехнический».

Результаты расчетов. Параметрические расчеты подтвердили глобальную неустойчивость течения со встречными струями. В рассмотренном диапазоне числа Рейнольдса выявлен переход от стационарного режима течения (I) к квазипериодическому нестационарному (II) и далее к хаотическому нестационарному режиму (III). Это иллюстрирует рис. 2, где показано изменение во времени компоненты скорости V_x в точке мониторинга при $Re = 20$ (режим I), $Re = 60$ (режим II) и $Re = 140$ (режим III). Точка расположена в центре параллелепипеда (см.

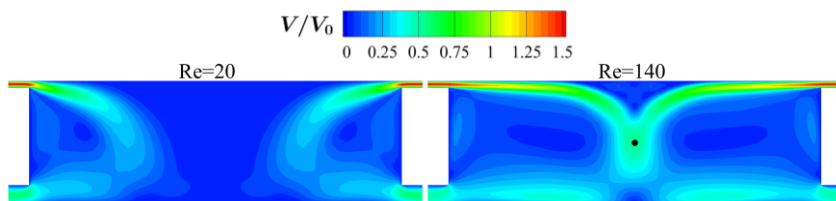


Рис. 3. Распределения полной скорости в продольном сечении полости: слева – стационарный режим, справа – осредненная скорость для хаотического режима

На рис. 3 представлены поля полной скорости в продольном срединном сечении полости. Поле для стационарного режима течения ($Re = 20$) сопоставлено с осредненным распределением для хаотического режима ($Re = 140$). Видно, что при малых Re струи слабо взаимодействуют между собой, и течение остается глобально устойчивым. Связанное с ростом Re увеличение дальности струй приводит к проявлению неустойчивости в области их взаимодействия и, как следствие, к развитию автоколебаний.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФ 24-19-00437.

Список литературы

1. Van Hooff T. and Blocken B. Mixing ventilation driven by two oppositely located supply jets with a time-periodic supply velocity: A numerical analysis using computational fluid dynamics // Indoor and Built Environment. 2020. Vol. 29(4). P. 603-620.

V.R. Adiatullin, S.A. Galaev, N.G. Ivanov, V.V. Ris

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

SELF-OSCILLATING FLOW REGIMES OF COUNTERING WALL JETS IN A RECTANGULAR CAVITY

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ПОДХОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССОВ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ЧАСТИЧНО ПОРИСТОЙ ДВУМЕРНОЙ ПОЛОСТИ

Задачи естественной конвекции в пористом слое актуальны в различных инженерных и природных процессах, таких как геотермальная энергетика, охлаждение электронных устройств и фильтрация грунтовых вод. Исследование таких процессов важно для оптимизации теплообмена, повышения энергоэффективности и предотвращения перегрева систем. Современные исследования направлены на моделирование и анализ влияния различных факторов, включая неоднородность пористой структуры и внешние тепловые воздействия.

При численном моделировании задач естественной конвекции с пористыми вставками важным вопросом является выбор модели для описания транспортных процессов в твёрдой структуре [1, 2]. В настоящей работе проведено сравнение двух подходов к моделированию естественной конвекции при наличии пористого слоя: модель Дарси и модель Дарси-Бринкмана. Модель Дарси и модель Дарси-Бринкмана различаются по учёту вязкостных эффектов и применимости к разным режимам течения в пористых средах. Модель Дарси описывает фильтрацию жидкости в пористых средах, предполагая, что инерционные и вязкостные эффекты в свободной жидкости незначительны. Она применима в случаях, когда сопротивление пористой структуры доминирует, а сдвиговые напряжения внутри пористого слоя не учитываются. Модель Дарси-Бринкмана расширяет классическую модель Дарси, добавляя член, аналогичный члену Лапласа в уравнении Навье-Стокса, что позволяет учитывать вязкостные эффекты и градиенты скорости в пористом слое. Это особенно важно в переходных зонах между пористыми средами и чистыми жидкостями, а также при более высоких скоростях движения рабочей среды, когда сдвиговые напряжения оказывают заметное влияние на течение.

В качестве изучаемой тепловой системы рассматриваемая замкнутая квадратная полость, заполненная жидкостью с переменными теплофизическими свойствами. Пористый слой изотропен и проницаем для жидкости. Для описания теплового взаимодействия между двумя фазами использовалась тепловая локально-равновесная модель, предполагающая равенство

температур пористого скелета и рабочей жидкости. Кроме того, в полости находится источник энергии. Течение ламинарно. Моделирование велось в рамках приближения Буссинеска. Математическая модель была реализована в безразмерных переменных «функция тока – завихрённость». Дифференциальные уравнения аппроксимировались и в дальнейшем решались методом конечных разностей на равномерной структурированной сетке с помощью собственного программного кода на языке программирования C++.

В результате были проведены численные эксперименты на основе двух выбранных моделей для описания течения в пористом слое. Показано влияние определяющих параметров на картину течения и на интегральные характеристики теплообмена. Кроме того, показаны отличия в получаемых результатах при использовании модели Дарси и модели Дарси-Бринкмана для рассматриваемой тепловой системы. Представлены различные варианты охлаждения источника энергии в изучаемой полости.

Исследование выполнено в рамках реализации проекта Российского научного фонда (соглашение № 24-71-00029).

Список литературы

1. Nield D.A., Bejan A. Convection in Porous Media // New York: Springer Science+Business Media (3 Ed), 2006. – 654 P.
2. Трифонова Т.А., Шерemet М.А. Сравнительный анализ моделей Дарси и Бринкмана при исследовании нестационарных режимов сопряженной естественной конвекции в пористой цилиндрической области // Компьютерные исследования и моделирование, 2013. – Т.5. – № 3. – С. 623–634.

G.A. Shashkin¹, M.S. Astanina¹, M.A. Sheremet¹

¹ National Research Tomsk State University,
Russia 634050, Tomsk, Lenina Ave., 36

USE OF VARIOUS APPROACHES FOR MODELING CONVECTIVE HEAT TRANSFER IN A PARTIALLY POROUS TWO-DIMENSIONAL CAVITY

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ ВОЗДУХА ОКОЛО ОДИНОЧНОЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ОРЕБРЕННОЙ ТРУБЫ

Оребренные трубы широко применяются в теплообменных аппаратах, которые используются в энергетике, системах вентиляции и кондиционирования, и других промышленных процессах. Исследование свободной конвекции около оребренных труб важно для оптимизации их конструкции и повышения эффективности теплообмена. Улучшение характеристик таких систем может снизить энергозатраты и повысить надежность оборудования. Представляются результаты численного моделирования свободной конвекции воздуха около одиночной горизонтальной оребренной трубы. Основное внимание в работе уделено обобщению данных многовариантных расчетов при варьировании в широких диапазонах линейного масштаба трубы и перепада температур между окружающей средой и поверхностью трубы.

Базовая конфигурация оребренной трубы соответствует [1], где представлены экспериментально измеренные данные теплоотдачи в зависимости от перепада температур между нагретой поверхностью трубы и окружающей средой. В расчетную область включена часть несущей трубы диаметром d_0 с ребром круглой формы диаметра $d = 2.15d_0$ (рис. 1а,б). Для базовой конфигурации $d_0 = 26.4$ мм, $d = 56.8$ мм. Толщина ребра задана постоянной $\delta = 0.02d_0$. Расстояние между ребрами s изменялось так, что величина s/δ принимала значение от 4.4 (базовая конфигурация) до 28.3. Соответствующие значения коэффициента оребрения $\phi = 21 \dots 4.3$. Внешние границы расчетной области удалены от поверхности трубы на расстояние $10d_0$.

Первая серия расчетов выполнена для базовой конфигурации трубы в соответствии с условиями [1]: температура несущей трубы T_w варьировалась от 315 до 506 К, температура окружающей среды задавалась равной $T_0 = 295$ К. В этом случае использовалась модель идеального несжимаемого газа, в которой физических параметры среды изменялись от температуры.

Во второй серии расчетов, проведенной для наименьшего перепада температур ($\Delta T = T_w - T_0 = 20$ К), варьировался линейный размер трубы так, что значения диаметра d_0 находились в диапазоне 26.4...50 мм. В этом случае учет сил плавучести осуществлялся с помощью приближения Буссинеска.

Рассмотренные значения числа Грасгофа Gr относятся к ламинарному режиму течения и находятся в диапазоне $10^4 \dots 10^6$.

Расчеты выполнены в пакете ANSYS Fluent 22.1. Стационарное течение воздуха около оребренных труб проводилось на основе решения полной системы уравнений Навье-Стокса. Задача решалась в сопряженной постановке: для алюминиевого ребра решалось уравнение теплопроводности. Учет излучения выполнен с помощью модели *Surface to Surface*.

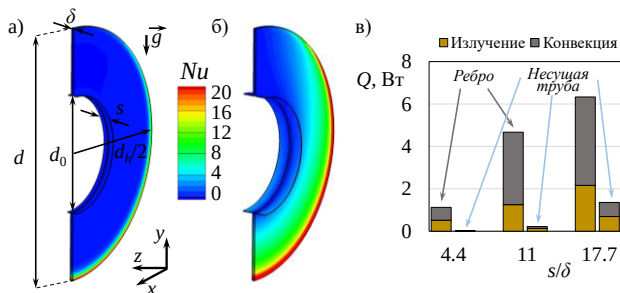


Рис. 1. Поле Nu на поверхности трубы для а) $s/\delta = 4.4$ и б) $s/\delta = 11$; в) сопоставление доли лучистого и конвективного теплосъема для различных s/δ

Для всех вариантов расчета показано, что под действием сил плавучести реализуется подъемное течение воздуха с формированием теплового факела над поверхностью трубы. Для базовой конфигурации трубы выполнено сравнение расчетных и экспериментальных данных по значениям осредненного по поверхности оребренной трубы числа Нуссельта Nu . На рис. 1а представлено типичное распределение Nu по поверхности ребра и несущей трубы (вариант с максимальным значением ΔT). В расчетах показано, что увеличение расстояния между ребрами приводит к существенной интенсификации теплосъема с ребра (рис. 1б). На рис. 1в представлено сопоставление доли лучистого и конвективного теплосъема с поверхности ребра и несущей трубы для различных s/δ . Проведено обобщение данных многовариантных расчетов и построена зависимость Nu от Gr .

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФ № 24-49-10003.

Список литературы

1. Маршалова Г.С. Тепловой расчет и проектирование аппаратов воздушного охлаждения с вытяжной шахтой // дисс. ... канд. техн. наук: 01.04.14. 2019. 153 с.

D.E. Ageev, M. A. Zasimova

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

STUDY OF FREE CONVECTION AIRFLOW AROUND A SINGLE HORIZONTAL FINNED TUBE

*Д.С. Семенюк¹, Я.И. Листратов¹*¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Россия, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, 14

ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ТЕЧЕНИЕ РТУТИ В КАНАЛЕ С КОНВЕКЦИЕЙ

В работе численно моделируется вынужденное течение ртути в горизонтальном канале с подогреваемой нижней стенкой и приложенным неоднородным поперечным магнитным полем. Канал имеет прямоугольное поперечное сечение с соотношением сторон 3:1. Исследуется возникновение магнитно-конвективных флуктуаций. Распределение магнитного поля и прочие условия задаются близкими к созданным в эксперименте на реальном лабораторном стенде. Экспериментальная установка, схематично изображенная на рис.1, описывается в работе [2].

В ранее опубликованной работе [1] рассмотрено и численно смоделировано течение ртути в канале такой же конфигурации в широком диапазоне чисел Рейнольдса Re , Грасгофа G_r и Гартмана Ha , изучены Q2D и 3D течения, проанализировано возникновение магнитно-конвективных флуктуаций. В качестве допущений граничные условия были заданы периодическими, магнитное поле однородным, не учитывалась проводимость стенок канала. Целью данной работы было приблизить условия моделирования к тому, что было реализовано в ходе эксперимента, оценить влияние неоднородности магнитного поля на течение электропроводящей жидкости, определить основные закономерности и качественные тенденции, а также подготовить базу для дальнейшего исследования задачи в расширенном диапазоне рассматриваемых параметров и сравнения результатов с известными экспериментальными данными.

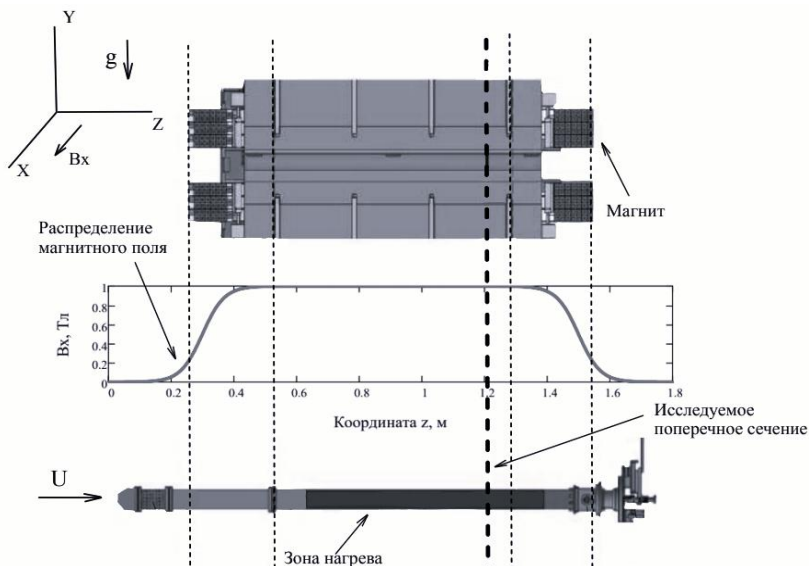


Рис. 1. Распределение магнитного поля по длине канала и схема экспериментальной установки, описанной в работе [2]

Список литературы

1. R. Akhmedagaev, O. Zikanov, and Y. Listratov. Magnetoconvection in a horizontal duct flow at very high Hartmann and Grashof numbers. *J. Fluid Mech.* (2022), vol. 931, A29
2. Belyaev I., Krasnov D., Kolesnikov Y., Biryukov D., Chernysh D., Zikanov O., & Listratov Y. Effects of symmetry on magnetohydrodynamic mixed convection flow in a vertical duct. *Physics of Fluids*. (2020), 32(9), 094106.

D.S. Semeniuk¹, Y.I. Listratov¹

¹ Moscow Power Engineering Institute,
Russia, 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya St., 14

INFLUENCE OF A NONUNIFORM MAGNETIC FIELD ON THE FLOW OF MERCURY IN A CHANNEL WITH CONVECTION

Д.Ю. Кучиев¹, А.А. Смирновский¹, С.И. Смирнов²

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

² Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, Россия, 185030, Петрозаводск, пр. Александра Невского, 50

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОЙ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ В СЛОЕ С ОБЪЕМНЫМ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЕМ ПРИ ПОМОЩИ LES И RANS ПОДХОДОВ

Введение. Турбулентная конвекция в слое с объемным тепловыделением является важной задачей в гидродинамике и теплофизике, встречающейся в различных природных и техногенных процессах [1, 2]. Численное моделирование подобных течений является актуальной задачей. Вихреразрешающий метод (LES) позволяет получать детальные характеристики турбулентного потока, но требует значительных вычислительных ресурсов. Подход RANS значительно менее затратен, но его точность зависит от выбора конкретной модели.

В работе рассматривается частный случай задачи Рэлея-Бенара: конвекция между холодными пластинами при наличии объемного тепловыделения. Прямое численное моделирование турбулентного течения при разных значениях числа Рэлея проведено в [2].

Постановка задачи. Рассматривается модельная задача о свободной конвекции в прямоугольной области размером $L \times L \times H$, где $L = 1.5$, $H = 1$, с равномерным объемным тепловыделением и охлаждаемыми горизонтальными стенками. На боковых границах задано условие периодичности. Движение жидкости описывается безразмерными уравнениями Навье-Стокса в приближении Буссинеска. Исследуются режимы течения при трёх значениях числа Рэлея: $Ra = 10^6$; 10^8 ; 10^{10} . Число Прандтля $Pr = \nu/a = 1$.

Численное моделирование проводилось с использованием ПО OpenFOAM v11. Для моделирования турбулентности использовались Implicit LES подход и модель рейнольдсовых напряжений LRR (Launder, Reece and Rodi Reynolds-stress turbulence model). Моделирование проводилось на прямоугольной сетке с размерами $50 \times 50 \times 200$ узлов, со сгущением к нижней и верхней стенке.

Анализ результатов. На рисунке 1, а представлены вертикальные профили осреднённой во времени и горизонтальным плоскостям температуры для трех значений числа Рэлея, полученные в настоящих

расчётах; также точками приведены данные из работы [2]. Модель LES лучше работает в режимах с относительно малыми значениями числа Рэлея по сравнению с LRR. Для $Ra = 10^{10}$ наблюдается хорошее совпадение DNS расчета из [2] с моделью LRR.

Сравнения пульсации температуры, полученные в различных режимах (рисунок 1, б), можно отметить хорошее согласие между двумя подходами к моделированию турбулентности при больших значениях числа Рэлея.

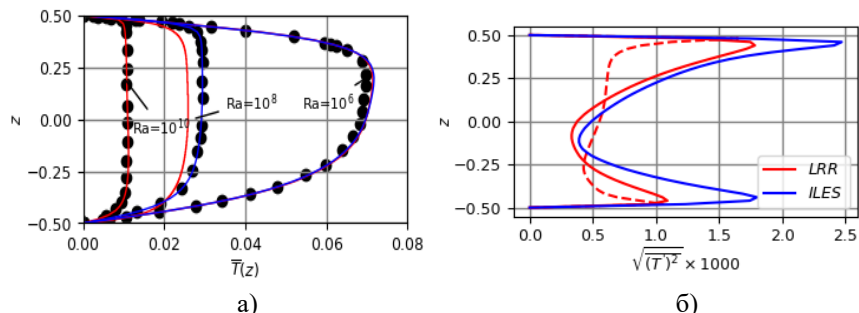


Рис. 1. а) Осредненная температура вдоль вертикальной линии (красный — LRR, синий — Implicit LES, черные символы — данные из [2]); б) Осредненные пульсации температуры вдоль вертикальной линии (сплошная — $Ra = 10^8$, пунктир — $Ra = 10^{10}$)

Благодарности. Исследование выполнено в рамках государственного задания Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (FMEN 2021-0019)

Список литературы

1. Bouffard D., Wüest A. Convection in lakes // Annual Review of Fluid Mechanics. 2019. Vol. 51. No. 1. Pp. 189–215.
2. Goluskin D., van der Poel E.P. Penetrative internally heated convection in two and three dimensions // Journal of Fluid Mechanics. – 2016. – Vol. 791. – R6. – DOI: 10.1017/jfm.2016.69

D.Yu. Kuchiev¹, A.A. Smirnovsky¹, S.I. Smirnov²

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

² Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre of RAS,
Russia, 185030, Petrozavodsk, Alexander Nevsky Ave., 50

NUMERICAL SIMULATION OF TURBULENT FREE CONVECTION IN A LAYER WITH VOLUMETRIC HEAT SOURCE USING LES AND RANS APPROACHES

*Е.А. Михайлов^{1,2}, И.Г. Поздеева³, А.П. Степанова², И.О. Тепляков⁴,
А.С.Тихонова², Т.Т.Хасаева^{2,5}*

¹ Физический институт имени П.Н.Лебедева РАН,
Россия, 119991, Москва, Ленинский проспект, 53

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

³ Московский инженерно-физический институт,
Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 31

⁴ Объединенный институт высоких температур РАН,
Россия, 125412, Москва, Ижорская ул., 13/2

⁵ Институт теории и прогнозирования землетрясенийРАН,
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 84/32

ЭЛЕКТРОВИХРЕВОЕ ТЕЧЕНИЕ ПРОВОДЯЩЕЙ ЖИДКОСТИ В ОСЕСИММЕТРИЧНОМ ЦИЛИНДРЕ ПРИ РАЗЛИЧНОМ РАСПОЛОЖЕНИИ ЭЛЕКТРОДОВ

Электровихревые течения возникают при прохождении электрического тока переменной плотности через различные хорошо проводящие среды [1], такие, как жидкий металл или электролит. Они могут быть связаны как с действием собственного магнитного поля электрического тока, так и с его взаимодействием с внешними магнитными полями (связанными, например, с наличием соленоида). Подобные задачи широко распространены в приложениях, связанных с металлургией.

Особую роль играют течения, которые распространяются в осесимметричных цилиндрах, которые служат хорошей моделью для различных технологических процессов. Нами были рассмотрены два принципиально отличающихся примера.

В первом случае одним из электродов служит дно сосуда, а второй имеет меньшие размеры и погружен в него сверху [2]. В таком случае существуют существенно неоднородные токи, которые могут быть найдены путем решения уравнения Лапласа для электрического потенциала. Также было найдено распределение собственного магнитного поля электрического тока в цилиндре, и поле создаваемой силы Ампера. Был исследован вопрос о том, как наличие внешнего соленоида может влиять на течение. Отдельно проанализировано, как конкретные размеры верхнего электрода могут повлиять на структуру течения.

Более интересным примером является «низкий» цилиндрический сосуд, внутри которого находится другой цилиндр, который служит одним из электродов. В таком случае ток растекается от внутреннего цилиндра к внешнему. Магнитное поле в таком случае создавалось с помощью внешнего соле-

ноида. Исследована структура и скорость течений с помощью методов математического моделирования. Качественно результаты могут быть сопоставлены с тем, что было получено ранее в автомодельном приближении [3], однако необходимо учитывать, что по сравнению с «высоким» цилиндром автомодельное приближение требует уточнения с использованием численных методов.

Также проводилась экспериментальная верификация полученных результатов. С этой целью проводились эксперименты с использованием растворов медного и железного купороса, которые в отличие от других хорошо проводящих жидкостей достаточно удобны для изучения. В целом, результаты эксперимента соответствуют данным моделирования.

Список литературы

1. Бояревич В.В., Фрейберг Я.Ж., Шилова Е.И., Щербинин Э.В. Электровихревые течения. Рига: Зинатне, 1985.
2. Е.А.Михайлов, А.П.Степанова, И.О.Тепляков. // Известия РАН. Серия физическая – 2025 (принята)
3. Е. А. Михайлов, А. П. Степанова, А. А. Таранюк, А. Ю. Чудновский // Инженерно-физический журнал. — 2024. — Т. 97, № 3. — С. 703.

***Е.А.Мikhailov^{1,2}, I. G. Pozdeeva³, A.P. Stepanova², I.O.Teplakov⁴,
A.S.Tikhonova², T.T. Khasaeva^{2,5}***

¹ P. N. Lebedev Physical Institute of RAS,
Russia 119991, Moscow, Leninsky Prospect, 53

² M. V. Lomonosov Moscow State University,
Russia 119991, Moscow, Leninskie Gori, 1

³ Moscow Engineering Physical Institute,
Russia 115409, Moscow, Kashirskoe shosse, 31

⁴ Joint Institute for High Temperatures of RAS,
Russia 115412, Moscow, Izhorskaya St., 13/2

⁴ Institute of Earthquake Prediction Theory of RAS,
Russia 115412, Moscow, Izhorskaya St., 13/2

ELECTROVORTEX FLOW OF CONDUCTING FLUID IN AXISYMMETRIC CYLINDER WITH DIFFERENT CONFIGURATION OF ELECTRODES

¹ Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Россия, 163002, Архангельск, набережная Северной Двины, 17

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

В кольцевых каналах при закрутке потока или вблизи криволинейных поверхностей могут образовываться вторичные вихри, усиливающие локальный теплообмен за счет диссипации тепловой энергии [1; 2]. Большинство исследований сосредоточено на вращении поверхностей канала и влиянии осевого потока w_z [3], однако образование вихрей при неподвижных стенках канала с начальной закруткой потока остается малоизученным. Цель работы — исследовать вторичные структуры в кольцевом канале с неподвижными стенками при локальной закрутке потока.

Для анализа аэродинамических характеристик использовался лазерный доплеровский анемометр (ЛДА), а для изучения теплообмена — датчики теплового потока Captec. Кольцевой канал имел параметры: $D_1 = 133$ мм, $D_2 = 172$ мм, длина $L = 1000$ мм, гидравлический диаметр $D_h = 40$ мм, относительная длина $z = D_h / L = 25$ и безразмерный радиус $\eta = R_1 / R_2 = 0,767$. Для визуализации потока применялся гидравлический стенд с реоскопической жидкостью. Второй канал имел параметры: $D_1 = 30$ мм, $D_2 = 47$ мм, $L = 700$ мм, $D_h = 27$ мм, $z = 25$, $\eta = 0,638$.

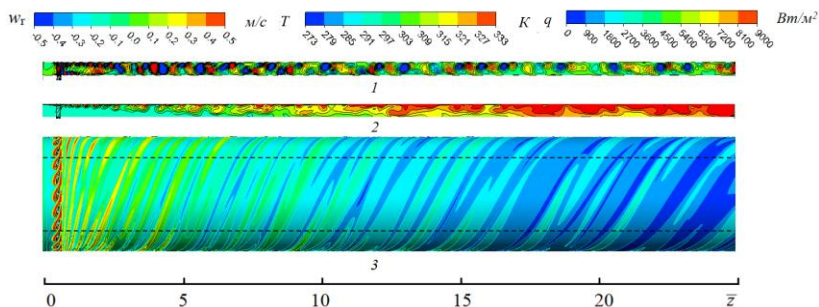
Локальная закрутка потока осуществлялась на входе в канал аксиально-лопастным закручивателем (22 лопасти, угол закрутки $\varphi = 0^\circ - 90^\circ$). Было проведено численное моделирование аэродинамики и теплообмена в ANSYS Fluent с моделью турбулентности SST k- ω CC.

Процесс формирования вторичного течения в виде закрученного потока с парной спирально-вихревой структурой можно наблюдать на рис. 1, где видно, как закручивание потока в кольцевом канале вызывает образование вторичных вихревых структур. Они проявляются как спиральные вихри, которые образуют пары, имеющие обратное друг другу вращение.



Рис. 1. Экспериментальная визуализация закрученного потока с парной спирально-вихревой структурой в кольцевом канале при $\varphi = 75^\circ$

На рис. 2 показаны результаты численного моделирования, которые позволяют более детально изучить влияние вторичных течений на теплообмен.



1 —радиальная скорость w_r ; 2 — температура T ; 3 — плотность теплового потока q
 Рис. 2. Распределение w_r , T и q при $\varphi = 75^\circ$ и $Re_{вх} = 10^3$

Процесс формирования спирально-вихревого течения в кольцевом канале можно разделить на три зоны. На начальном участке влияние геометрии аксиально-лопастного закручивателя активно определяет начальную закрутку потока, создавая первичные вихревые структуры. В зоне активного формирования вторичных течений эти вихри усиливают турбулентность и локально интенсифицируют теплообмен. В зоне затухания вторичные течения ослабевают из-за раскрутки потока, что приводит к уменьшению турбулентности и снижению эффективности теплообмена.

Закрученные потоки с парной спирально-вихревой структурой позволяют локально интенсифицировать теплообмен. Изменяя угол закрутки потока, можно управлять вторичными течениями и, соответственно, теплообменом в кольцевых каналах теплообменников.

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

Список литературы

1. Щукин В.К. Теплообмен и гидродинамика внутренних потоков в полях массовых сил. - 2-е изд., перераб. и доп. / В.К. Щукин. – М: Машиностроение, 1980.
2. A review of heat transfer between concentric rotating cylinders with or without axial flow / M. Fénot [и др.] // International Journal of Thermal Sciences - INT J THERM SCI. – 2011. – Т. 50. – С. 1138-1155.
3. Andereck C.D. Flow regimes in a circular Couette system with independently rotating cylinders / C.D. Andereck, S.S. Liu, H.L. Swinney // Journal of Fluid Mechanics. – 1986. – Vol. 164. – P. 155-183.

E.V. Pankratov¹

¹ Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov,
 Russia, 163002, Arkhangelsk, Severnaya Dvina Embankment, 17

INVESTIGATION OF AERODYNAMICS AND HEAT TRANSFER OF SWIRLING FLOW WITH A PAIRED SPIRAL-VORTEX STRUCTURE IN AN ANNULAR CHANNEL

Е.М. Шенягин¹, Н.А. Лучинкин¹, И. А. Беляев¹

¹Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН)

Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр.2

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

Ограниченные запасы ядерного топлива и ежегодное увеличение количества радиоактивных отходов создают необходимость в разработке концепций, расширяющих возможности ядерной энергетики: замкнутых систем ядерного топливного цикла, термоядерных реакторов с возможностью самодостаточности по тритию и термоядерных источников нейтронов. Существуют проекты, предполагающие повышение эффективности и экологичности ядерных устройств предполагающие использование жидких металлов в качестве теплоносителя и рабочих сред для эксплуатации ядерного топлива.

Жидкие металлы обладают рядом особенностей, которые делают их, с одной стороны, привлекательной рабочей средой (теплофизические свойства, отсутствие замедления нейтронов, высокая температура кипения и низкое давление насыщенных паров), а с другой стороны, создают трудности в их использовании (высокая температура плавления, химическая и коррозионная активность по отношению к воздуху и конструкционным материалам). Кроме того, использование жидких металлов в сильных магнитных полях многократно увеличивает затраты на перекачку, а также приводит к возникновению сложных эффектов при взаимодействии магнитного поля с вихревыми структурами, генерируемыми силами плавуемости вблизи зон нагрева. Отсутствие надежной экспериментальной базы (особенно для свободной и смешанной конвекции жидких металлов в магнитном поле) значительно затрудняет численное моделирование проектируемых систем ядерных и термоядерных установок и делает невозможным создание и отладку новых численных моделей.

Экспериментальные исследования на реальных теплоносителях, таких как натрий, свинец, эвтектические сплавы свинца и лития, осложняются их спецификой, а также инженерными и финансовыми трудностями при создании и эксплуатации экспериментальных установок.

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

В данной работе представлены результаты влияния поперечного магнитного поля на теплообмен и структуру свободоконвективных потоков, генерируемых цилиндрическим нагревателем малого диаметра (макет тепловыделяющего элемента) в замкнутом объеме ртути. Рабочий участок состоял из вертикального квадратного канала высотой 650 мм, с поперечным сечением 56x56 мм, и цилиндрическим нагревателем, расположенным по центру. На внешних стенках канала с помощью водяного охлаждения обеспечивалось условие постоянной температуры стенки. Измерения проводились с помощью погружного микротермопарного зонда в диапазоне чисел Грасгофа $Gr = 9 \cdot 10^{14} - 7 \cdot 10^{15}$ ($q = 100-750$ Вт), чисел Гартмана $Ha = 0 - 1135$ ($B = 0-1.6$ Тл). Для определения локального числа Грасгофа использовалась актуальная высота нагревателя, для определения Гартмана – половина поперечного размера канала вдоль магнитного поля. Также было проведено сравнительное экспериментальное исследование влияния различных диаметров цилиндрического нагревателя на структуру свободоконвективных потоков и проведена оценка коэффициентов теплоотдачи на поверхности нагревательного элемента.

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

E.M. Shenyagin¹, N.A. Luchinkin¹, I.A. Belyaev¹

¹ Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences,
Russia 152934, Moscow, Izhor'skaya St., 13, 2

Е.А. Белавина^{1,2}, Р.Ф. Рахимов^{1,2}, Н.Ю. Пятницкая^{1,2}.

¹ Объединенный институт высоких температур Российской академии наук,
Россия, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2

² ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Россия, г. Москва, 111250, Красноказарменная улица, дом 14, стр. 1

СМЕШАННАЯ КОНВЕКЦИЯ ИМИТАТОРА РАСПЛАВА СОЛИ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Возможность применения расплавов солей с добавлением фторидов урана в качестве рабочего тела в перспективных разработках ядерно-энергетических систем для новой технологической базы России требует решения нескольких ключевых научно-технических проблем. Эти проблемы, в первую очередь, связаны с разработкой надежных конструкционных материалов для работы с расплавами солей и исследованием их теплофизических особенностей, как теплоносителя. Следует отметить, что особенности эксплуатации расплавов фторидных солей различных составов и теплообмена в них отличаются, и требуют дополнительного анализа.

Проведение натурных экспериментов с реальными составами расплавов фторидных урансодержащих солей трудоёмко и ресурсозатратно, что затрудняет получение экспериментальных данных. Однако проведение экспериментального исследования, приближенного к условиям реальных энергетических установок, становится возможным благодаря использованию имитаторов расплавов солей. Составление рекомендаций по выбору модельного теплоносителя, который удовлетворяет требованиям, предъявляемым к лабораторному исследованию, в значительной мере повышает эффективность эксперимента.

Для воссоздания условий, характерных для теплообменных каналов ядерных и термоядерных установок, на базе существующего «Ртутного МГД-комплекса» создан солевой контур, позволяющий исследовать закономерности теплообмена и гидродинамики имитаторов расплава солей в условиях смешанной конвекции. Контур позволяет реализовывать условия однородного и неоднородного (одностороннего) режимов обогрева при наличии сильных магнитных полей для различных конфигураций рабочего участка в расширенном диапазоне режимных параметров (чисел Рейнольдса, Гартмана, Грасгофа) [1-3]. Применительно к задачам по исследованию течения теплоносителя в элементах термоядерного реактора, расширенная экспериментальная база позволила провести поисковое исследование границ начала влияния термогравитационной конвекции на поток имитатора расплава в магнитном поле.

Цель работы заключается в экспериментальном исследовании смешанной конвекции имитаторов расплавов солей в условиях действия массовых сил различной природы в каналах различной конфигурации в широком диапазоне режимных параметров (числа Рейнольдса, числа Гартмана, числа Грасгофа), применительно к условиям течения в контурах охлаждения ядерных и термоядерных реакторов.

В работе приведены результаты исследования совместного влияния смешанной конвекции и магнитного поля для условий опускного течения расплава соли 20% раствора КОН в условиях однородного обогрева ($Grq=4,3 \cdot 10^8 - 1,6 \cdot 10^9$) в расширенном диапазоне режимных параметров ($Re=3600-14000$) с увеличением числа Гартмана до максимально допустимых, исходя из конструктивных особенностей установки ($Ha=33$). При определенном соотношении параметров Re , Gr и Ha , данный вид течения является неустойчивым. Эта неустойчивость проявляется в виде возвратных течений у стенки и приводит к дополнительной «турбулизации» течения в режимах, где в изотермическом случае произошло бы практически полное подавление турбулентности. Однако, в доступных для эксперимента диапазонах чисел Ha , Gr , Re оценены безразмерные коэффициенты теплоотдачи и отражена их зависимость от чисел Ri и N при $Pr=6$ для круглой вертикальной трубы в условиях однородного обогрева и расширенного диапазона режимных параметров. В условиях малых и больших чисел Re ($Re=3600-14000$) под воздействием поперечного магнитного поля ($Ha=0-33$) низкочастотных аномальных магнитноконвективных пульсаций, которые присущи течению жидкого металла в магнитном поле, в рассмотренном диапазоне безразмерных критериев подобия не обнаружено.

Список литературы

1. Belyaev I. A. et al. Experimental study of molten salt mixed convection in a pipe affected by transverse magnetic field // *Magnetohydrodynamics* (0024-998X). – 2019. – Т. 55.
2. Беляев И. А. и др. Теплообмен при смешанной конвекции расплава соли в присутствии магнитных полей // *Письма в Журнал технической физики*. – 2019. – Т. 45. – №. 10. – С. 27-30.
3. Белавина, Е.А., И.А. Беляев, Н.Ю. Пятницкая Исследование теплогидравлики имитатора расплава соли при течении в канале в условиях неоднородного обогрева // *ВАНТ Ядерно-реакторные константы*. – 2021. – Т.4. – С. 82-97.

E.A. Belavina^{1,2}, R.F. Rakhimov^{1,2}, N.Y. Pyatnitskaya^{1,2}

¹ Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences
Russia, Moscow, 125412, Izhorskaya st. 13 Bd.2.

² National Research University "Moscow Power Engineering Institute"
Russia, Moscow, 111250, Krasnokazarmennaya street, 14 Bd.1.

MIXED CONVECTION OF THE MOLTEN SALT SIMULATOR UNDER MAGNETIC FIELD CONDITIONS

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ И ЛОКАЛЬНОГО ТЕПЛООБМЕНА ПРИ СВЕРХЗВУКОВОМ ОБТЕКАНИИ ЦИЛИНДРА, ОГРАНИЧЕННОГО С ТОРЦОВ ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ПЛАСТИНАМИ

Высокоскоростные течения вязкого газа в каналах реализуются во многих практических приложениях, в частности, детальные данные о структуре течений такого типа важны при эксплуатации газотурбинных установок. Течения характеризуются сложной структурой потока и изучены далеко не в полном объеме [1-2]. При наличии препятствия, закрепленного в канале, картина течения усложняется: газодинамические структуры взаимодействуют с областями отрыва и подковообразными вихрями, причем структура вязко-невязкого взаимодействия существенно зависит от геометрических параметров задачи.

Настоящая работа посвящена численному моделированию сверхзвукового обтекания цилиндра, закрепленного между параллельными пластинами (рис. 1). Расстояние между пластинами варьировалось и было равно $H/D = 12.5$ и $H/D = 4$. Также проводились расчеты для цилиндра в полуограниченной области ($H/D = \text{inf}$). Расчетная область охватывала четверть исследуемой конфигурации. Решались осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса для совершенного газа. Цилиндр обтекался воздухом ($\gamma = 1.4$, $C_p = 1005$ Дж/(кг·К)), полная температура набегающего потока $T_0 = 2480$ К. На входной границе расчетной области предписывались профили числа Маха и температуры для пограничного слоя заданной толщины $\delta_{99\%}/D = 0.5$. Число Маха набегающего потока $M = 1.85$, число Рейнольдса, построенное по диаметру цилиндра $Re_D = 3 \cdot 10^4$. На поверхности цилиндра и пластины (рис. **Ошибка! Источник ссылки не найден.**) задавалась постоянная температура, при этом температурный фактор составлял $T_w/T_{in} = 5$.

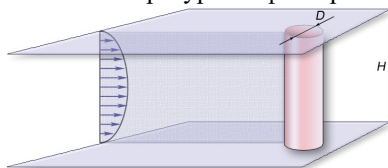


Рис. 1. Схема расчетной области

Расчеты выполнялись с применением программного кода SINF/Flag-S, разрабатываемого в СПбПУ; использовались ресурсы суперкомпьютерного центра СПбПУ (www.scc.spbstu.ru). Все расчеты проводились в стационарной постановке, вычисление конвективных потоков на гранях контрольных объемов проводилось на основе схемы AUSM второго порядка точности (детали численного метода описаны в [3]). Квазиструктурированные расчетные

сетки состояли из ~ 4 млн (базовая сетка) и ~ 34 млн ячеек (измельченная сетка) и удовлетворяли требованию $y^+ < 1$. Использовались следующие модели турбулентности: $k-\omega$ SST, Спаларта-Аллмараса без учета поправки на сжимаемость и с учетом этой поправки.

Параметрические расчеты показали, что структура течения с уменьшением расстояния между пластинами качественно меняется: увеличивается длина и ширина отрывной области, а соответственно и область высокого нагрева (рис. 2). В случае $H/D = 4$ из-за увеличения длины отрывной области формируется два головных скачка уплотнения: первый соответствующий λ -конфигурации, а также второй “висячий” (рис. 2).

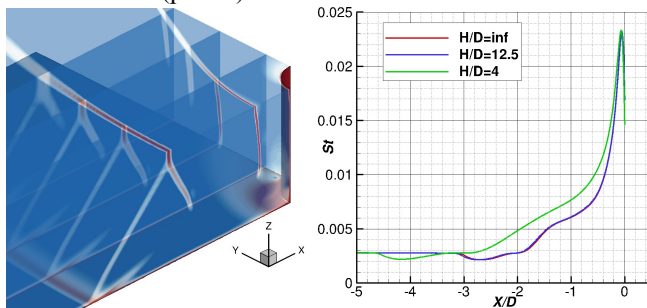


Рис. 2. Ударно-волновая структура течения для случая $H/D = 4$ и распределение числа Стэнтона вдоль линии симметрии

Список литературы

1. Bruce P.J.K., Babinsky H., Tartinvill B., Hirsch C. Corner Effect and Asymmetry in Transonic Channel Flows // AIAA Journal, 2011. - V. 49. - № 11. - P. 2382-2392.
2. Gnani F., Zare-Behtash H., Kontis K. Pseudo-shock waves and their interactions in high-speed intakes // Progress in Aerospace Sciences, 2016. - V. 82. - P. 36–56.
3. Kolesnik E.V., Smirnov E.M., Smirnovsky A.A. RANS-based numerical simulation of shock wave/turbulent boundary layer interaction induced by a blunted fin normal to a flat plate // Computers & Fluids, 2022. - V. 247.

E.V.Babich, E. V. Kolesnik

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

STUDY OF FLOW STRUCTURE AND LOCAL HEAT TRANSFER IN SUPERSONIC FLOW PAST A CYLINDER BOUNDED AT ITS ENDS BY PARALLEL PLATES

Е.А. Карнозова¹, С.С. Попович²

¹ МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет,
Россия, 119234, Москва, Ленинские горы, д.1, стр. 2

² НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова,
Россия, 119192, Москва, Мичуринский пр., д.1

ТЕРМОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ТЕЧЕНИЯХ ЗА УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

Изучение процессов теплообмена в условиях высокоскоростных течений связано с необходимостью получения данных для многих технических приложений, например, для прогнозирования нагрева обтекаемых поверхностей, определением свойств теплозащитных материалов, обеспечением оптимальных условий горения в камерах сгорания летательных аппаратов. При этом для исследований тепловых потоков в ударно-волновых течениях со сложной структурой требуется комплексный подход с использованием современных цифровых методов регистрации и анализа данных. Целью данной работы является сравнительный анализ подходов к исследованию процессов теплообмена в высокоскоростных газовых потоках в установках непрерывного и кратковременного действия.

В экспериментах на ударной трубе кратковременного действия исследовались тепловые поля, формирующиеся на обтекаемых поверхностях газодинамического канала после дифракции плоской ударной волны на теле вращения, установленном по оси симметрии течения [1]. Эксперименты проводились в рабочей секции камеры низкого давления ударной трубы с прямоугольным сечением 24×48 мм при значениях числа Маха падающей плоской ударной волны $M=2.5-4.1$. В качестве модели использовались осесимметричные цилиндры двух диаметров (12 и 7.5 мм), затупленные по сфере. Тепловое излучение регистрировалось через боковые кварцевые стенки рабочей секции с помощью высокоскоростной инфракрасной камеры Telops FAST M200 (рабочий диапазон 1.5–5.1 мкм, частота съемки 1000 кадр/с, время экспозиции одного кадра 500 мкс).

Анализ полученных термографических полей проведен совместно с результатами теневой высокоскоростной визуализации (рис. 1). По полученным инфракрасным снимкам были измерены временные параметры длительности теплового излучения, регистрируемого в зоне пограничного слоя на различных участках обтекаемых поверхностей, и проведен сравнительный анализ времен релаксации теплового излучения от этих участков в зависимости от числа Маха падающей ударной волны.

В экспериментах на аэродинамической установке непрерывного действия получены результаты экспериментального исследования влияния падающей ударной волны на параметры теплоотдачи при обтекании пластины сверхзвуковым потоком воздуха при числе Маха 2.48 [2, 3]. Ударная волна формировалась с помощью плоского клина, установленного на верхней стенке рабочей части установки. Темп охлаждения пластины фиксировался с помощью ИК-камеры InfraTEC IR8800, что позволило рассчитать распределения коэффициентов восстановления температуры и теплоотдачи.

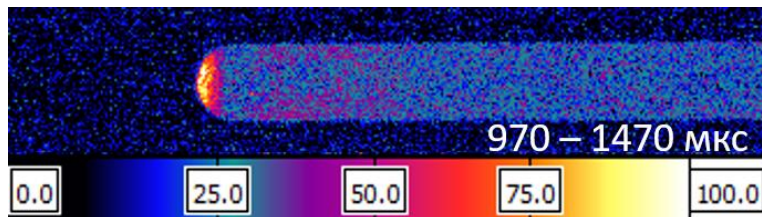


Рис. 1. Термограмма обтекания цилиндра [1]

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ №23-19-00096.

Список литературы

1. Karnozova E., Znamenskaya I., Doroshchenko I., Sysoev N., Lutsky A. Energy conversions at shock wave interaction with pulse discharge in profiled channel // *Physics of Fluids*. 2024. Vol. 36, no. 12. P. 126120.
2. Леонтьев А. И., Лущик В. Г., Макарова М. С., Попович С.С. Коэффициент восстановления температуры в сжимаемом турбулентном пограничном слое // *Теплофизика высоких температур*. 2022. Т. 60, № 3. С. 455–480.
3. Popovich S.S., Zditovets A.G., Kiselev N.A., Vinogradov U.A. Experimental study of aerodynamic heating in the region of an incident shock wave boundary layer interaction // *Acta Astronautica*. 2025. Vol. 229. P. 804-813.

E.A. Karnozova¹, S.S. Popovich²

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics,
Russia 119234, Moscow, Leninskie Gory, 1-2

² Lomonosov Moscow State University, Institute of Mechanics,
Russia 119192, Moscow, Michurinsky prospect, 1

THERMOGRAPHIC INVESTIGATION OF HEAT FLUXES IN HIGH-SPEED FLOWS BEHIND SHOCK WAVES

ТЕЧЕНИЕ И ТЕПЛООБМЕН В ПУЧКАХ ТРУБ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ И КОМПОНОВКИ

Объект исследования – пучки теплообменных труб круглого сечения. Размеры опытных образцов: длина 0,076 м, внешний диаметр образцов $d_t=0,022$ м. Выемки на опытных образцах наносились на внешнюю поверхность в шахматном порядке и занимали 50, 75 и 100 % от внешней поверхности образца. Увеличение площади поверхности образцов составляет $f=1,21$; 1,31; 1,41, соответственно. Основные геометрические размеры выемок на опытных образцах: диаметр выемок $d=0,006$ м, $h=0,003$ м продольный шаг $t=0,012$ м, поперечный (по винтовой линии) шаг выступов $s=0,008$ м (рис.1). В экспериментах исследовались относительно глубокие выемки $h/d=0,5$. Опытные образцы в рабочем участке исследовались при коридорном расположении (рис.2) при продольных S1 и поперечных S2 шагах образцов. При шахматном расположении (компоновке) труб в пучке поперечный шаг S1 составлял 0,044 м и продольный шаг S2 составлял 0,022 м, что обеспечило значение относительных шагов $a=S1/d_t$ и $b=S2/d_t$ шагов и $a \times b=2 \times 1$. При коридорном расположении (компоновке) образцов в рабочем участке исследовались поперечный шаг S1= 0,044 м и продольный шаг S2=0,044 м, что обеспечивало относительный $a=S1/d_t$ и $b=S2/d_t$ шагов и $a \times b=2 \times 2$.

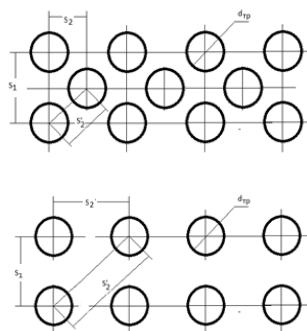
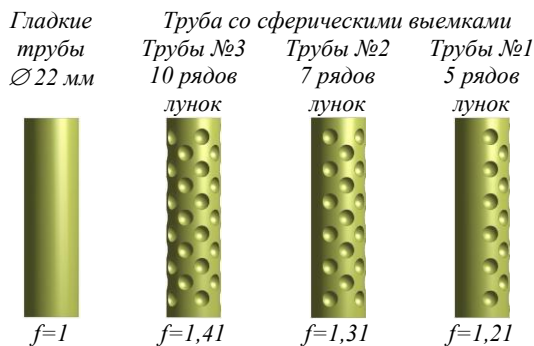


Рис 1 – Опытные образцы

Проведено исследование средних коэффициентов теплоотдачи труб в различных рядах и в пучке в целом шахматных и коридорных пучков, сопротивления пучков, структуры обтекания на основе высокоскоростной визуализации и PIV-метода.

Выявлено, что увеличение аэродинамического сопротивления в шахматных пучках труб составило: для $f = 1,21$ и $1,31$ в среднем $1,05$ – $1,11$ раз, а при $f = 1,41$ – сопротивление приблизительно равен уровню сопротивления в каналах с пучком гладких труб. Для коридорных пучков труб: для $f = 1,21$; $1,31$ и $1,41$ – в $1,1$ – $1,3$ раза.

Определена интенсификация теплоотдачи в шахматных пучках труб: для $f = 1,21$ – $1,01$ – $1,08$ раза, $f = 1,31$ – $1,03$ – $1,13$ раза, $f = 1,41$ – $1,06$ – $1,14$ раза и в коридорных пучках труб: соответственно $1,01$ – $1,05$; $1,01$ – $1,1$ и $1,05$ – $1,16$ раз..

Наибольшая теплоаэродинамическая эффективность выявлена для пучков труб с площадью нанесения вихрегенераторов 100% при шахматной компоновки и составила $1,1$. Наименьшая эффективность наблюдается у пучка труб с площадью нанесения вихрегенераторов 50% и составила $0,95$, что ниже эффективности гладкого канала. Наибольшая теплоаэродинамическая эффективность для пучков труб с площадью нанесения вихрегенераторов 100% при коридорной компоновки и составила $0,98$ – $1,0$. Наименьшая эффективность для пучка труб с площадью нанесения вихрегенераторов 50 и 75% и составила в среднем $0,89$.

Также проведены и показаны рациональные размеры и компоновки плоскоовальных труб, в том числе с овально-траншейными выемками на боковых поверхностях. Проведено исследование одиночным труб круглого сечения и их тандемов со спойлерами в кормовой части труб и проволочными вихрегенераторами в передней области труб с углами размещения 40° с каждой стороны.. Исследованы средние коэффициенты теплоотдачи труб в различных рядах и в пучке в целом шахматных и коридорных пучков, сопротивления пучков, структуры обтекания на основе высокоскоростной визуализации и PIV-метода.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках Соглашения о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на оказание государственных услуг FZSU-2023-0004.

R.G. Kadyrov, I.A.Popov

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

HYDRODYNAMICS AND HEAT EXCHANGE IN BUNDLES OF TUBES OF VARIOUS SHAPES AND LAYOUTS

И. Г. Поздеева^{1,2}¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 31² Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАСТВОРОВ ЭЛЕКТРОЛИТОВ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРО- ВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ

Исследование электро-вихревых течений (ЭВТ) имеет широкий спектр практического применения: от оптимизации перемешивания расплавов в металлургии до изучения механизмов генерации атмосферных вихрей и океанических течений. Чаще всего ЭВТ в экспериментальных установках моделируется легкоплавкими металлами и их эвтектическими смесями, например, Ga и эвтектики на его основе. В данной работе рассмотрена возможность использования водных растворов электролитов в качестве электропроводящей среды.

Основные достоинства такого подхода очевидны: по сравнению с жидкими металлами это более дешевый и безопасный аналог. Так же водные растворы электролитов оптически-прозрачны, что позволяет наблюдать ЭВТ непосредственно. Кроме того, при электролизе на электродах зачастую выделяются либо частицы осадка, либо пузырьки газа, которые могут выступать в качестве трековых частиц. Недостатки тоже достаточно существенны: меньшие значения проводимых токов и более сильный джоулев нагрев. Кроме этого, приходится учитывать химические реакции, в которых помимо ионов электропроводящей соли могут участвовать ионы растворителя и материалы электродов. Самым популярным растворителем является вода, что дает нам возможные реакции с ионами H^+ и OH^- , которые образуются при диссоциации молекул воды. Водные растворы кислот при диссоциации также дают ионы H^+ и анионы, которые участвуют в переносе заряда, за счет чего такие растворы являются хорошими проводниками тока второго рода. Недостаток использования кислот – бурное газовыделение на катоде в результате реакции восстановления водорода. Поэтому водные растворы кислот удобно использовать только на совсем малых значениях токов или в геометрии, когда всплывающие пузырьки водорода могут выступать в качестве трековых частиц. Если же газовыделение нежелательно, то следует рассмотреть электролиз водных растворов солей благородных металлов, поскольку, как следует из ряда электроотрицательности катионов, при электролизе первыми восстанавливаются именно благородные металлы, затем

водород, далее простые металлы, щелочноземельные и последними щелочные. Самым доступным и распространенным является электролиз растворов солей меди на медных электродах. Electrodes, в свою очередь, могут быть химически инертные, например графитовые, или участвующие в химических реакциях, к которым относятся медные. Поскольку при электролизе раствора солей меди на катоде (-) будет реакция восстановления иона меди и выпадение осадка, а на аноде (+) – реакция окисления меди и растворение электрода, то концентрация токопроводящих ионов в растворе будет оставаться постоянной, что очень удобно для расчетов электромагнитных сил. Соли меди, особенно образованные от сильных кислот, например, серной или соляной, достаточно хорошо растворяются в воде и проводят электрический ток, но предельные значения токов, все-таки, несколько ниже, чем для жидких металлов при тех же условиях.

Следует учитывать, что максимальные токи в установке ограничиваются проводимостью раствора. Одним из способов повышения проводимости насыщенного раствора является добавление в раствор соли некоторого количества одноименной кислоты (например, серной кислоты в раствор сульфата меди). Так как в переносе заряда участвуют все ионы в растворе, а не только участвующие в реакциях на электродах, то добавление кислоты повышает концентрацию ионов, а следовательно, и проводимость раствора. Возможные реакции на электродах при этом остаются почти неизменными, кроме реакций с участием одновалентного иона меди, чувствительных к кислотности среды. В некоторых случаях повысить максимальные токи в установке удастся за счет более развитой поверхности электрода, например, при замене электрода, выполненного из медной пластины на электрод, выполненный из мелкой сетки, токи увеличиваются из-за увеличения поверхности химической реакции. Варианты с ускорением химической реакции каталитически не очень актуальны, так как в этих случаях ускоряется выпадение осадка, что в дальнейшем приводит к помутнению раствора и мешает проведению экспериментов. В целом, использование растворов электролитов актуально для наглядной демонстрации электро-вихревых течений в относительно небольших лабораторных установках с малыми значениями исследуемых токов.

I. G. Pozdeeva ^{1,2}

¹ National Research Nuclear University MEPhI, Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe sh 31

² National Research Center "Kurchatov Institute", Russia, 123182 Moscow, Akademika Kurchatova pl., 1

USING ELECTROLYTE SOLUTIONS FOR EXPERIMENTAL MODELING OF ELECTRO-VORTEX FLOWS

Л.В. Плотников¹, В.А. Шурупов¹, Д.Н. Красильников¹, Д.А. Давыдов¹

¹ Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Россия, 620062, Екатеринбург, ул. Мира, 19

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ КЛАПАННОГО УЗЛА НА ГАЗОДИНАМИКУ И ТЕПЛООБМЕН ПОТОКА ГАЗА В ЦИЛИНДРЕ ДВИГАТЕЛЯ В ПРОЦЕССЕ ВПУСКА

Газодинамические и теплообменные процессы в цилиндре поршневых двигателей (ДВС) требуют перманентного совершенствования для повышения их эксплуатационных и экологических показателей [1]. Известно, что модернизация элементов впускной системы действенным способом улучшения процесс впуска и внутрицилиндровых процессов [1, 2]. Поэтому цель данного исследования заключалась в оценке влияния профилированного клапанного узла во впускной системе на газодинамику и теплоотдачу стационарных потоков в цилиндре поршневого ДВС.

В данной работе изучался процесс истечения стационарного потока воздуха в цилиндр через тарельчатый клапан и впускную систему разных конфигураций. Базовая впускная система состояла из цилиндра (диаметр 82 мм, высота 100 мм), прямого трубопровода (длина 200 мм, диаметр 32 мм), криволинейного канала в головке блока (длина 150 мм, диаметр 32 мм) и тарельчатого клапана (диаметр 32 мм, высота подъема 10 мм). Модернизация впускной системы состояла в применении клапана с тарелкой в форме квадрата (сторона 28,5 мм) и изготовлении криволинейного канала с поперечным сечением в форме квадрата (длина 150 мм, сторона 28,5 мм). Геометрические размеры модифицированных элементов выбирались исходя из равенства площадей поперечного сечения с базовыми.

В рамках экспериментальных исследований были получены следующие сведения: структура потока (поля скоростей) в цилиндре для разных конструкций клапанного узла и разных расходов воздуха через систему (способом PIV метода); мгновенные значения скорости и степень турбулентности потока воздуха в цилиндре (метод тепловой анемометрии) и интенсивность теплоотдачи в цилиндре (метод тепловой анемометрии).

Исследования выполнялись для стационарного движения потока воздуха для объемных расходов q от 0,01 до 0,04 м³/с через впускную систему. Температура воздуха составляла 23 ± 1 °С, давление $98,2 \pm 0,5$ кПа.

Отдельные результаты исследования интенсивности теплоотдачи по высоте цилиндра для разных впускных систем представлены на рис. 1.

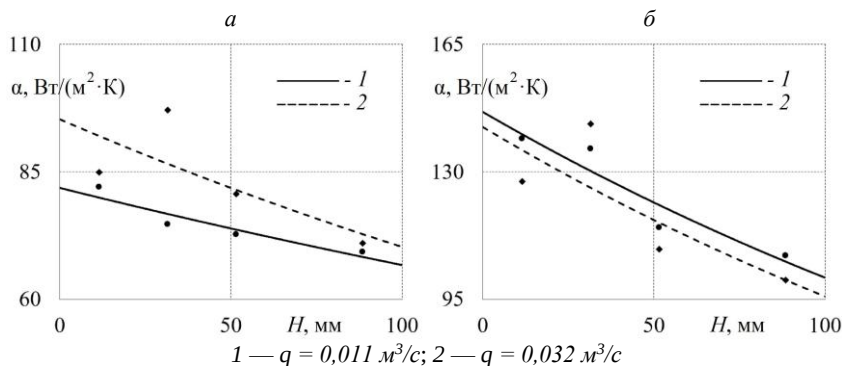


Рис. 1. Изменение коэффициента теплоотдачи α по высоте цилиндра H при его заполнении через базовую конструкцию головки блока (1) и профилированный клапанный узел (2) для разных расходов q через систему

Таким образом, профилирование клапанного узла приводит к:

- заметному изменению структуры потока внутри цилиндра;
- росту степени турбулентности на 20-45 % по сравнению с базой;
- к интенсификации (до 30 %) теплоотдачи в цилиндре при малых расходах через систему, так и к ее подавлению (до 10 %) при больших расходах газа по сравнению с базой.

Работа выполнена при поддержке РНФ в рамках научного проекта 23-29-00022.

Список литературы

1. Кавтарадзе Р.З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях: Москва: МГТУ им. Баумана, 2016. 515 с.
2. Плотников Л.В. Нестационарные тепломеханические процессы в системах газообмена поршневых двигателей с турбонаддувом. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2020. 204 с.
3. Plotnikov L. The influence of longitudinal duct profiling on unsteady gas dynamics and the heat transfer of pulsating gas flows in the outlet system of reciprocating-engine // Thermal Science and Engineering Progress. 2024. Vol. 55. A.n. 102977.

L.V. Plotnikov¹, V.A. Shurupov¹, D.N. Krasilnikov¹, D.A. Davydov¹

¹ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, Russia 620062, Ekaterinburg, Mira St., 19

INFLUENCE OF VALVE UNIT DESIGN ON GAS DYNAMICS AND HEAT EXCHANGE OF GAS FLOW IN THE ENGINE CYLINDER DURING THE INTAKE PROCESS

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ В КУБИЧЕСКОЙ ПОЛОСТИ С ПОРИСТЫМ СЛОЕМ В РАМКАХ ТЕПЛОВОЙ ЛОКАЛЬНО- НЕРАВНОВЕСНОЙ МОДЕЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХ ТИПОВ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

Исследование процессов естественной конвекции в кубических полостях с источником энергии актуально для оптимизации теплообмена в инженерных и природных системах, таких как охлаждение электронных устройств, ядерные реакторы и климатические модели. Анализ этих процессов помогает улучшить управление тепловыми потоками, повысить энергоэффективность и предотвратить перегрев в замкнутых объёмах. Современные исследования сосредоточены на изучении влияния различных параметров, включая расположение источника энергии, свойства теплоносителя и граничные условия, что является важными вопросами при прогнозировании тепловых режимов.

Настоящая работа посвящена численному исследованию естественной конвекции жидкости с переменной вязкостью в замкнутой трёхмерной области с пористым слоем и твердым теплогенерирующим элементом на нижней стенке. Для моделирования течения жидкости в пористой среде была использована модель Дарси-Бринкмана, а для учета теплового взаимодействия между твердым скелетом и чистой жидкостью была применена тепловая локально-неравновесная модель, в рамках которой температуры двух фаз рассчитываются независимо друг от друга [1, 2]. Режим течения – ламинарный. Также справедливо приближение Буссинеска. Система управляющих уравнений была записана с использованием безразмерных переменных «вектор потенциал – вектор завихренности» и решена методом конечных разностей на равномерной вычислительной сетке. В качестве численного метода решения использован метод конечных разностей. Реализация решения была выполнена на языке программирования C++ с использованием собственного численного кода. Предложенный метод решения был верифицирован на ряде модельных задач с детальным тестированием сходимости сетки для обеспечения независимости решения.

В качестве результатов были полученные трёхмерные распределения полей температуры и скорости, а также временные зависимости интегральных характеристик течения и теплопереноса (число Нуссельта, средняя темпера-

тура полости, средняя температура источника). При этом одна модель граничных условий предполагала разделение энергии между двумя фазами с учетом эффективных проводимостей и градиентов температур; вторая модель предполагала, что фазы на границе раздела сред получают тот же тепловой поток, что и граница. Полученные распределения отражают разность в характеристиках течения и теплообмена с использованием подходов для определения температурных потоков на межфазной границе. Также было проанализировано влияние теплофизических свойств пористого слоя и рабочей среды на гидродинамические и теплофизические свойства системы и на эффективность теплоотвода от источника энергии.

Исследование выполнено в рамках реализации проекта Российского научного фонда (соглашение № 24-71-00029).

Список литературы

1. Astanina M.S., Sheremet M.A. Numerical study of natural convection of fluid with temperature-dependent viscosity inside a porous cube under non-uniform heating using local thermal non-equilibrium approach // *Transport in Porous Media*, 2023. – Vol. 149. – № 3. – P. 763–783.
2. Mikhailenko S.A., Sheremet M.A. Thermal Convection in a Partially Porous Rotating Chamber Using Local Thermal Non-Equilibrium Models // *Transport in Porous Media*, 2022. – № 143. – P. 619–637.

M.S. Astanina¹, M.A. Sheremet¹

¹ National Research Tomsk State University,
Russia 634050, Tomsk, Lenina Ave., 36

NUMERICAL INVESTIGATION OF FREE CONVECTION IN A CUBIC CAVITY WITH A POROUS LAYER BASED ON THE LOCAL THERMAL NON-EQUILIBRIUM MODEL WITH TWO TYPES OF BOUNDARY CONDITIONS

ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПЕРЕХОД В ПУЛЬСИРУЮЩЕМ ПОТОКЕ

Ламинарно-турбулентный переход (ЛТП) остается самой малоизученной областью гидродинамики. ЛТП является очень актуальной темой и представляет практический интерес для аэродинамики и теплообмена. Для гладких труб без каких-либо искусственных возмущений или неоднородностей естественный переход к турбулентности обычно происходит при числе Рейнольдса порядка 2000 – 2400.

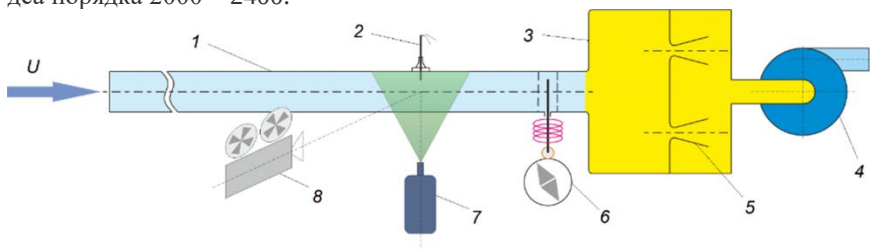


Рис. 1. Схема рабочей установки: 1 – рабочий участок, 2 – термоанемометр с координатным устройством, 3 – ресивер, 4 – воздушный компрессор, 5 – критические сопла с задвижками, 6 – пульсатор потока, 7 – лазер постоянного действия и 8 – скоростная камера для оптических измерений

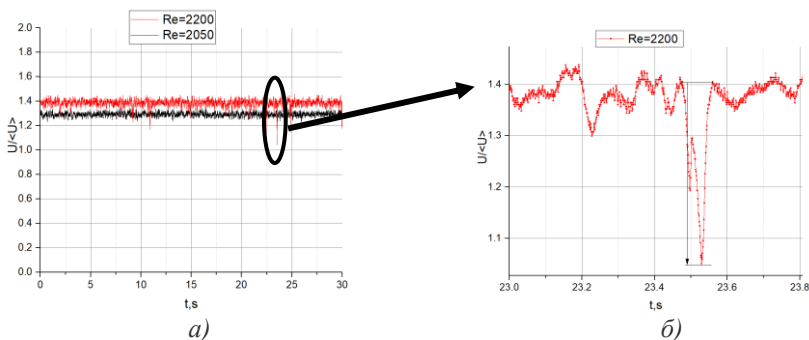


Рис 2. Возникновение турбулентных пятен в стационарном режиме: а) на осциллограмме скорости; б) в увеличенном виде

При переходных числах Рейнольдса в стационарном потоке турбулентность появляется в виде локализованных в пространстве структур так называемых турбулентных порывов (в англоязычной литературе ruff), рис 2.

Турбулентный порыв представляет собой интересный гидродинамический объект, который в некотором отношении можно рассматривать как структурную единицу турбулентности. Поток в разных зонах по длине канала в одно и то же время может быть и ламинарным, и турбулентным.

Для пульсирующего режима установлено, что при плавном увеличении среднего за период колебаний числа Рейнольдса при фиксированной амплитуде и частоте вынужденных колебаний потока первые турбулентные пятна (порывы) возникают в начале фазы торможения потока, когда текущая скорость еще близка к максимальной за период, но уже появился положительный градиент давления (рис. 3).

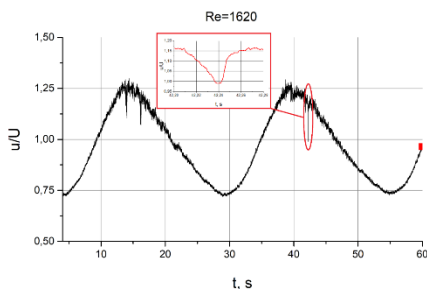


Рис. 3. Возникновение турбулентных пятен при низких числах Рейнольдса

В пульсирующем потоке механизм перехода к турбулентности такой же, как и в стационарном случае. Однако этот переход при пульсациях потока нельзя характеризовать только числом Рейнольдса, поскольку он зависит еще и от изменяющегося во времени продольного градиента давления. В данной работе в качестве количественной характеристики текущего градиента давления использовался безразмерный параметр ускорения Кейса. Эксперименты показали, что при переходе при ЛТП среднеквадратичные пульсации скорости потока существенно выше уровня турбулентных пульсаций. В плоском канале длина области турбулентных порывов оказалась в несколько раз меньше, чем в круглом канале. По-видимому, это связано с разным изменением скоростной составляющей количества движения при переходе от ламинарного профиля скорости к турбулентному.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 22-19-00507-П

M. R Kuchkarova^{1,2}, R.R. Shakirov¹, N.I. Miheev¹

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

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

LAMINAR-TURBULENT TRANSITION IN A PULSATING FLOW

Н.Д. Пашкова, В.М. Молочников, И.В. Никифоров

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

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А. Н. Туполева – (КАИ), 420111 г. Казань, ул. К. Маркса, 10

ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПЕРЕХОД ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА В ГЛАДКОМ КАНАЛЕ

Цель работы: изучение эволюции структуры течения в гладкой трубе после лопаточного завихрителя с углом 23° . Труба имела внутренний диаметр $d = 17,4$ мм. (рис. 1). Исследования проводились на стационарном режиме течения при числах Рейнольдса $Re=240; 500; 800; 1200; 1500; 1640$. Измерения выполнены методом SIV.

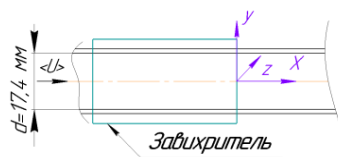


Рис. 1. Схема участка

Полученные значения степени закрутки потока S [1] (рис. 2) на участке $0...2,5d$ при больших значениях числа Re плохо описывают реальное распределение рассматриваемой величины, так как в этой области наблюдаются четыре локальных максимума продольной компоненты скорости, которые ниже по течению выравниваются по сечению канала. Из анализа результатов

видно, что изучаемый параметр снижается во всей области измерений при $Re = 500$ и 240 , а при $Re = 800...1640$ слабо зависит от числа Рейнольдса. При $Re=240$ степень закрутки на расстоянии $x/d \geq 19$ практически полностью затухает, и профиль

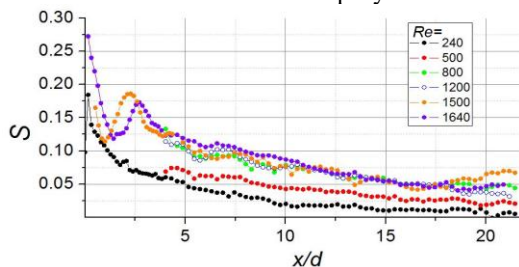


Рис. 2. Изменение степени закрутки в канале

продольной компоненты скорости приобретает классический ламинарный вид. При $Re=500$ и 800 профиль также имеет тенденцию к восстановлению, но в области измерений не успевает полностью сформироваться. С дальнейшим увеличением числа Рейнольдса за завихрителем наблюдается асимметрия профиля скорости относительно оси канала. При $Re=1640$ максимум продольной компоненты скорости начинает поочередно смещаться к периферии. Такой характер поведения профилей может свидетельствовать о прецессии ядра вихря за завихрителем. Это подтверждается анализом осциллограмм поперечной компоненты скорости на оси, в которых наблюдается характерная частота

порядка 8 Гц. Скорее всего, прецессия возникает вследствие возмущений, создаваемых зоной обратных токов за центральным телом завихрителя, зафиксированных только при этом Re .

Закрутка потока инициирует появление окружной компоненты скорости, в профилях которой принято выделять две области: вынужденного вихря в приосевой зоне течения и свободного вихря в периферийной зоне. За завихрителем эта граница четко выражена и находится на расстоянии $\approx 0,8$ радиуса. Вниз по потоку граница этих зон размывается, область свободного вихря расширяется и при $x/d \approx 14$ профиль окружной компоненты скорости приближается к равномерному. Стоит отметить, что при «идеальной» закрутке область вынужденного вихря движется по закону твердого тела [1], но в реальном эксперименте рост окружной компоненты скорости не имеет линейной зависимости по мере удаления от оси канала.

Для анализа возможного ламинарно-турбулентного перехода исследованы осциллограммы и изучено распределение пульсаций скорости. На оси канала был зафиксирован рост пульсаций при $Re=1200$ ($x/d=15$ и $x/d>18$; $0,08 <U>$ с пиками у стенок и на оси), $Re=1500$ ($x/d>18$; $0,25 <U>$), $Re=1640$ ($x/d>12$; $0,25 <U>$). При других числах Рейнольдса уровень пульсаций не превышал 6% от $<U>$. У стенок увеличение исследуемого параметра наблюдалось только при $Re=1500$ и 1640 с определенной периодичностью по длине канала ($x/d \approx 7$; 12 ; 17). Скорее всего, рост пульсаций вызван взаимодействием вихревого следа за лопатками завихрителя со стенкой трубы. Кроме того, при этих двух числах Re была зафиксирована перемежаемость течения (чередование ламинарных и турбулентных режимов), что также является одним из признаков локального перехода к турбулентности.

Полученные результаты могут быть использованы для дальнейших исследований в области влияния закрутки потока на структуру отрывных зон при ламинарных и переходных режимах течения (гемодинамика, теплообменные аппараты и т.д.)

Список литературы

1. Щукин В.К., Халатов А.А. Теплообмен, массообмен и гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах/ Букинист-1982-200 с.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 25-19-00133

N.D. Pashkova, V.M. Molochnikov, I.V. Nikiforov

Federal State Budgetary Institution of Science «Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences», 420111 Russian Federation, Tatarstan, Kazan, ul. Lobachevskogo, 2/31
Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev–KAI,
420111 Russian Federation, Tatarstan, Kazan, K. Marksa st., 10

LAMINAR-TURBULENT TRANSITION OF A SWIRLING FLOW IN A SMOOTH CHANNEL

Н.Е. Балабаев¹, Н.А. Лучинкин¹, И. А. Беляев¹

¹Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН)

Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр.2

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

Жидкие металлы в оболочке термоядерного реактора, будут подвергаться сильному воздействию термогравитационной конвекции (ТГК) и магнитных полей. Эти факторы необходимо учитывать, поскольку такие компоненты планируется интегрировать во внутреннюю структуру реактора.

Текущая работа по изучению магнитогидродинамического (МГД) поведения потоков жидких металлов основана на изучении процессов в потоках жидких металлов. Результаты, полученные в рамках таких исследований, обладают ограниченной применимостью к условиям, характерным для термоядерных реакторов, что обусловлено невозможностью точного воспроизведения экстремальных параметров. К числу таких параметров относятся чрезвычайно сильные магнитные поля и высокие тепловые нагрузки (от 4 до 20 МВт/м²), возникающие вследствие излучения плазмы и процессов поглощения нейтронов. Величина таких тепловых потоков существенно зависит от пространственного положения, конструктивных особенностей и энергетического режима работы реактора.

Совместное воздействие магнитного поля и ТГК на МГД) теплоперенос в бланкете термоядерного реактора характеризуется сложной зависимостью, определяемой не только критериями Рейнольдса (Re), Гартмана (Ha), Грасгофа (Gr) и Рэлея (Ra), но и относительной ориентацией векторов скорости потока, индукции магнитного поля, плотности теплового потока и гравитационного ускорения.

В связи с этим, адекватное прогнозирование процессов теплопередачи в разрабатываемых термоядерных установках с магнитным удержанием плазмы требует расширения диапазона исследуемых чисел Гартмана (Ha), что, в первую очередь, достигается посредством увеличения значения магнитной индукции в экспериментальных исследованиях.

Предстоящая научная работа направлена на решение задачи, связанной с изучением фундаментальных особенностей канальных МГД-

течений электропроводящих жидкостей в сильных магнитных полях в режимах, характеризующихся экстремальными температурными градиентами и развитием магнитно-конвективных пульсаций (МКП) скорости и температуры большой амплитуды.

В статье представлены результаты экспериментальных исследований влияния электропроводности стенки круглой трубы на формирование магнитно-конвективных пульсаций в вертикальном канале.

Рассмотрен восходящий поток ртути в круглых трубах с внутренним диаметром 40 мм и толщиной стенок 2,5 мм и 10 мм. Для улучшения электрического контакта между ртутью и стенками на внутренней поверхности труб было использовано меднение. Исследование гидродинамики и теплопередачи проводилось для случая равномерного нагрева стенок труб с использованием погружных микротермопарных зондов.

Список литературы

1. Лучинкин Н.А., Балабаев Н.Е., Федосеев Л.А., Шенягин Е.М., Беляев И.А. Гидравлическое сопротивление круглой трубы при течении жидкого металла в поперечном магнитном поле //Письма в Журнал технической физики. – 2024. – Т. 50. – №. 21. – С. 47-50.

N.E.Balabaev¹, N.A. Luchinkin¹, I.A. Belyaev¹

¹ Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences,
Russia 152934, Moscow, Izhorskaya St., 13, 2

РАЗРАБОТКА ГИБРИДНОГО ПОДХОДА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СМЕШАННОЙ КОНВЕКЦИИ В КАНАЛАХ С НАГРЕВАТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ И РЁБЕРНОЙ СИСТЕМОЙ ОХЛАЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ И РЕШЕТОЧНОГО МЕТОДА БОЛЬЦМАНА

В представленной работе решается задача численного моделирования смешанной конвекции в пространственном канале с тепловыделяющим элементом и рёберной системой охлаждения, расположенной на его поверхности. Область решения представляет собой пространственный канал в форме параллелепипеда, внутри которого – на нижней стенке, располагается локальный источник тепловыделения. На поверхности нагревателя находятся теплоотводящие ребра. На входе в канал поступает охлаждающая жидкость с постоянными теплофизическими свойствами. Схематически область решения задачи представлена на рисунке 1.

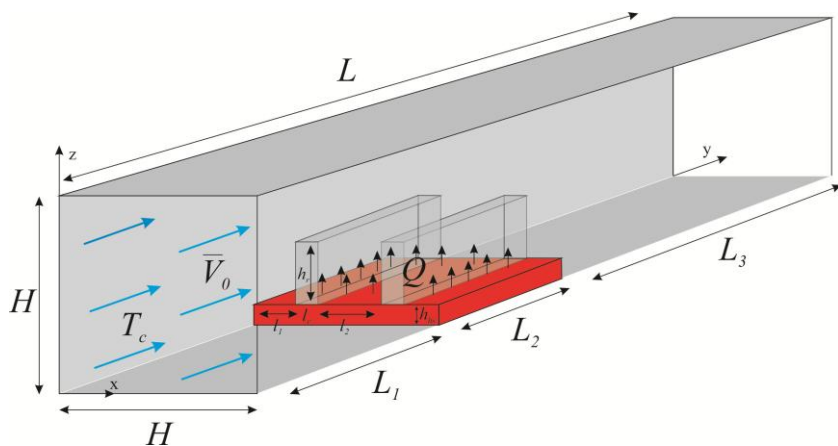


Рис. 1. Область решения задачи

Система уравнений, описывающая сопряжённую смешанную конвекцию в области решения, сформулированная на основе метода конечных разностей, может быть записана следующим образом:

В жидкой фазе:

$$\frac{\partial \bar{\Omega}}{\partial \tau} + (\bar{V} \cdot \nabla) \bar{\Omega} - (\bar{\Omega} \cdot \nabla) \bar{V} = \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 \bar{\Omega} + \frac{\text{Ra}}{\text{Pr} \cdot \text{Re}^2} \bar{M}$$

$$\text{rot} \bar{\Omega} = -\nabla^2 \bar{V}, \quad \bar{M} = \left\{ \frac{\partial \Theta}{\partial Y}, -\frac{\partial \Theta}{\partial X}, 0 \right\}$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + (\bar{V} \cdot \nabla) \Theta = \frac{1}{\text{Pr} \cdot \text{Re}} \nabla^2 \Theta,$$

Внутри теплопроводных рёбер:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \frac{a_r/a_f}{\text{Pr} \cdot \text{Re}} \nabla^2 \Theta$$

Внутри источника энергии:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \frac{a_{hs}/a_f}{\text{Pr} \cdot \text{Re}} \nabla^2 \Theta + Q$$

Метод решения представленной системы уравнений описан в работах [1-2].

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-79-10341.

Список литературы

1. Gibanov N.S., Sheremet M.A. Numerical Simulation of Conjugate Mixed Convection in 3D Channel with Heat-Generating Flat Element and Symmetrical Solid Two-Fin System. *Symmetry*, 2023, – Vol. 15(7), article №1467.
2. Gibanov N.S., Hussain M., Sheremet M.A. Three-dimensional heat transport and fluid flow in a channel with heat-generating source and heat removal ribs. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. – 2025. – Vol. 161, article № 108552.

N.S. Gibanov, M.A. Sheremet

Tomsk State University,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 36

**DEVELOPMENT OF A HYBRID APPROACH FOR SOLVING
PROBLEMS OF MIXED CONVECTION IN CHANNELS WITH
HEAT GENERATING ELEMENTS AND A RIB COOLING
SYSTEM BASED ON THE FINITE DIFFERENCE METHOD AND
THE LATTICE BOLTZMANN METHOD**

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ЭККЕРТА-ВАЙСА ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ОБТЕКАНИИ ПАРЫ КРУГОВЫХ ЦИЛИНДРОВ СЖИМАЕМОМ ПОТОКОМ ВОЗДУХА

Задняя поверхность теплоизолированного круглого цилиндра, помещенного в дозвуковой высокоскоростной поток существенно охлаждается. Это явление известно как аэродинамическое охлаждение или эффект Эккерта–Вайзе. Этот эффект связан с перераспределением температуры торможения (энергоразделением) в нестационарном вихревом следе и приводит к отрицательным значениям коэффициента восстановления температуры r (температура задней поверхности цилиндра становится ниже статической температуры набегающего потока). Как показано в численном исследовании [1], эффект весьма чувствителен к интерференции потоков за соседними цилиндрами. В данной работе экспериментально исследовано аэродинамическое охлаждение одиночного круглого цилиндра и пары круглых цилиндров в диапазонах чисел Маха и Рейнольдса $M=0.3–0.7$ и $Re_D=0.6–1.8 \cdot 10^5$.

Эксперименты проводились в аэродинамической трубе баллонного типа Института механики МГУ [2]. Рабочий канал был образован плоскими стенками и имел постоянное сечение (ширина 250 мм, высота 175 мм). Число Маха в рабочем канале изменялось путем изменения давления торможения в форкамере. Числа Рейнольдса и Маха не могли изменяться независимо друг от друга. Модели представляли собой круглые цилиндры диаметром $D=10$ мм, изготовленные из оргстекла. Цилиндры занимали всю высоту канала. Единичный цилиндр размещался в плоскости симметрии, пара цилиндров размещалась симметрично относительно плоскости симметрии канала. Для увеличения области двумерного течения в ядре потока [3] на расстоянии 15 мм от нижней и верхней стенке установлены концевые пластинки общей длиной по потоку $7D$, длиной $2.5D$ вверх по потоку от оси цилиндров и шириной 250 мм.

Эксперименты проводились в двух режимах работы аэродинамической трубы. В первом режиме число Маха в рабочей части плавно изменялось от значений, соответствующих запиранию рабочей части ($M \approx 0.7$ и $M \approx 0.63$ для одиночного цилиндра и пары цилиндров соответственно) до $M \approx 0.3$. В течение этого периода цилиндры оставались неподвижными. Температура и давление регистрировались на задней линии торможения цилиндра в местах расположения термпар и отборников давления (рис. 1). Это позволило

определить зависимости коэффициентов давления и коэффициентов восстановления температуры от числа Маха набегающего потока.

Во втором режиме работы аэродинамической трубы число Маха в рабочей части поддерживалось постоянным. Оба цилиндра вращались, что позволяло регистрировать распределения давления и температуры по поверхности цилиндра.

В работе показано, что эффект Эккерта-Вайзе для пары цилиндров может как увеличиваться, так и уменьшаться в сравнении с обтеканием единичного цилиндра.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-10035, <https://rscf.ru/project/24-79-10035/>.

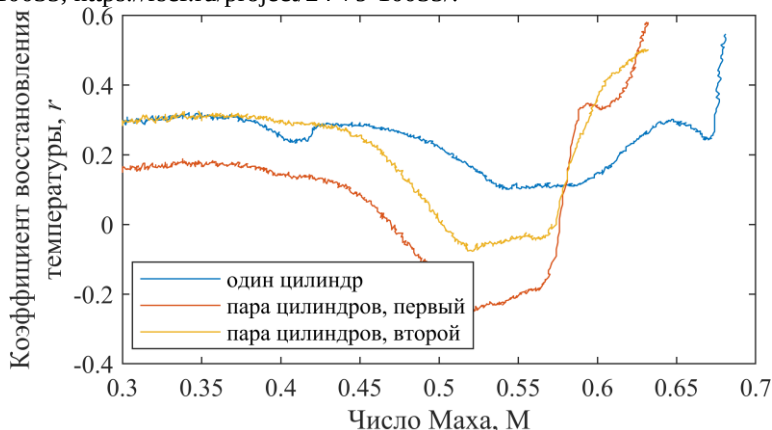


Рис. 1. Зависимость коэффициента восстановления температуры на задней линии торможения от числа Маха для одиночного цилиндра и пары цилиндров

Список литературы

1. *Aleksyuk A.I.* The Eckert-Weise effect and energy separation under the flow interference behind side-by-side cylinders // *J. Fluid Mech.* 2021. Vol. 915. P. 1–31.
2. *Zditovets A.G., Kiselev N.A., Popovich S.S., Vinogradov Y.A.* Experimental investigation of the Eckert-Weise effect (aerodynamic cooling) of pair side-by-side circular cylinders in a compressible cross-flow // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2024. Vol. 233. P. 126061.
3. *Fox T.A., West G.S.* On the use of end plates with circular cylinders // *Exp. Fluids.* 1990. Vol. 9, № 4. P. 237–239.

N.A. Kiselev¹, N. S. Malastowski¹

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

ECKERT-WEISS EFFECT IN COMPRESSIBLE AIR FLOW OF FLOW AROUND A PAIR OF CIRCULAR CYLINDERS

Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН», Институт энергетики и перспективных технологий, 420111 г. Казань, ул. Лобачевского д. 2/31

Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН», Институт энергетики и перспективных технологий – структурное подразделение ФИЦ КазНЦ РАН, 420111 г. Казань, ул. Лобачевского д. 2/31 *e-mail: n.miheev@mail.ru

ДИНАМИЧЕСКИ НЕРАВНОВЕСНЫЕ ПРОЦЕССЫ: НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ И ИНЖЕНЕРНЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

К динамически неравновесным течениям можно отнести большинство градиентных течений, обтекание дискретно шероховатой стенки, течения с вынужденными колебаниями потока или другими видами нестационарности. В них характеристики турбулентности потока могут не успевать приходить в равновесие с изменившимися условиями обтекания стенки. Управление неравновесностью потока можно использовать для целенаправленного изменения интенсивности процессов турбулентного переноса.

С использованием оптического метода измерений SIV [1] получен обширный экспериментальный материал по развитию турбулентности в неравновесных течениях с оценкой вклада генерации, диссипации, конвекции и диффузии в баланс энергии турбулентности. Такая информация позволила глубже понять механизмы формирования турбулентности в неравновесных течениях.

В динамически неравновесном пограничном слое на стенке плоского диффузора экспериментально установлено повышение энергии турбулентных пульсаций, достигающее четырехкратного увеличения по сравнению с безградиентным течением. Выявлены механизмы формирования поля турбулентности в условиях динамически неравновесного течения в плоском безотрывном диффузоре. Установлено, что на профиль турбулентности в канале с динамическими воздействиями на поток влияют не только локальные условия обтекания стенки, но конвекция и диффузия турбулентности. Установлена тесная корреляционная связь между локальным числом Стантона и максимумом рейнольдсовых напряжений в локальной области стенки.

Для пульсирующих потоков получена обобщающая зависимость, связывающая критическое число перехода к турбулентности, вычисленное по текущей скорости потока, с текущим числом Кейса, вычисленном по текущему ускорению потока.

Обобщены экспериментальные данные по гидродинамическим и тепловым процессам в канале с низкой дискретной шероховатостью стенки в виде сплошных и разрезных поперечных выступов высотой. Найдены конфигурации разрезных выступов, обеспечивающие повышение коэффициента теплогидравлической эффективности до 1,35. Наклонные выступы позволяют сформировать организованный массообмен по нормали к поверхности. Формирование вторичных течений и конвективный перенос турбулентности в неравновесных течениях способствуют интенсификации теплоотдачи и повышению теплогидравлической эффективности, а целенаправленное формирование вторичных течений является перспективным направлением дальнейших исследований в области интенсификации теплообмена.

Исследования процессов переноса в динамически неравновесных турбулентных течениях, выполняемые в ИЭПТ КазНЦ РАН, имеют инновационную направленность и многочисленные инженерные приложения в области теплоэнергетики, транспортного машиностроения и трубопроводного транспорта. В частности, результаты исследований реализованы в прикладной области, связанной с созданием новых эталонных установок для контроля метрологических характеристик систем измерений количества энергоносителей при их добыче и транспортировке. С 2013г. по настоящее время ФИЦ КазНЦ РАН совместно ООО НПП Ирвис выполнен цикл исследований и разработок, результатом которых стало создание четырех эталонных установок в составе Государственных первичных эталонов единиц массы, объема и расхода газа. В результате исследований найдены и внедрены пионерские решения, которые способствовали выходу эталонной базы РФ в области расходомерии на лидирующие позиции в мире.

Список литературы

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

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

N. I Mikheev

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

**DYNAMICALLY NON-EQUILIBRIUM PROCESSES: SCIENTIFIC
FOUNDATIONS AND ENGINEERING APPLICATIONS**

ЭЛЕКТРОВИХРЕВЫЕ ТЕЧЕНИЯ В СОСУДАХ ВРАЩЕНИЯ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

Исследованы электровихревые течения [1] жидкометаллической среды, возбуждённые переменным электрическим током и собственным магнитным полем в осесимметричных контейнерах — полусфере и цилиндре. Проведены численное моделирование методом конечных элементов и экспериментальное измерение поля скорости. В результате взаимодействия радиально растекающегося электрического тока с собственным магнитным полем возникает электромагнитная сила Ампера, под действием которой возникает тороидальный вихрь в объёме расплава.

Результаты исследования ЭВТ находят применение при проектировании металлургических печных комплексов, термоядерных реакторов, аккумуляторов и жидкометаллических батарей.

Численное моделирование. Проведены численные расчёты ЭВТ модельного расплава In-Ga-Sn [2] методом конечных элементов в осесимметричных рабочих областях — полусфере и цилиндре, ограниченных медными стенками. На оси вращения у свободной поверхности расплава расположен вертикальный цилиндрический токоподвод со сферическим наконечником радиусом 2,5 мм. Для генерации ЭВТ подводился гармонически изменяющийся ток амплитудой в диапазоне частот от 0,5 до 50 Гц. Ток отводился через медные стенки.

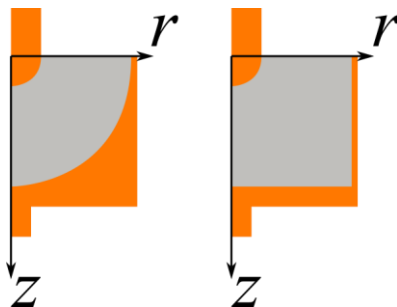


Рис. 1. Расчётные области. Слева с полусферической рабочей областью, справа — с цилиндрической. Серым показана расчётная область расплава, оранжевым — электропроводные стенки

В задаче решались уравнения: электромагнетизма, гидродинамики с переменными теплофизическими свойствами, теплопередачи. Деформация свободной поверхности расплава и влияние внешних магнитных полей не учитывались.

Экспериментальное исследование проведено на опытной установке с полусферической рабочей областью, описанной в работах [3] и [4]. Для измерения скорости использован волоконно-оптический преобразователь скорости, описанный в [5]. Частота тока в экспериментах 50 Гц.



Рис. 2. Развитие ЭВТ в полусферической (слева) и цилиндрической (справа) рабочих областях

Получены и представлены поля скоростей и температуры. Показаны зависимости от осевой координаты и времени скоростных и температурных характеристик. Рассчитаны и сравнены между собой кинетические энергии течения.

Список литературы

1. Электровихревые течения / Бояревич В.В., Фрейберг Я.Ж., Шилова Е.И. и др.; Под ред. Э.В. Щербинина. Рига: Зинатне, 1985.
2. Y. Plevachuk, V. Sklyarchuk, S. Eckert, G. Gerbeth, and R. Novakovic, Thermophysical properties of the liquid Ga–In–Sn eutectic alloy, *Journal of Chemical & Engineering Data*, vol. 59, no. 3, pp. 757–763, 2014.
3. Тепляков И.О., Исследование структуры электровихревого течения жидкого металла в полусферической полости. Диссертация на соискание учёной степени к.т.н. Москва: ФГБУН ОИВТ РАН, 2015.
4. Influence of pulsed modes of a magnetic field on an electric vortex flow / D. A. Vinogradov, I. O. Teplyakov, Y. P. Ivochkin [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series* : 8, Moscow, 18–21 октября 2021 года. – Moscow, 2021. – P. 012050. – DOI 10.1088/1742-6596/2088/1/012050.
5. Жилин В.Г. Волоконно-оптические измерительные преобразователи скорости и давления. М.: Энергоатомиздат, 1987. 112 с.

P.I. Polyakov, I.O. Teplyakov

Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences
Russia, 125412, Moscow, Izhorskaya st. 13 Bd.2

**ALTERNATING CURRENT INDUCED ELECTROVORTEX
FLOWS IN REVOLUTED VESSELS**

И.А. Загайнов^{1,2}, С.С. Попович²

¹ МГТУ имени Н.Э. Баумана,
Россия, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5

² НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова,
Россия, 119192, Москва, Мичуринский проспект, д.1

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТА ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЯ ГАРТМАНА-ШПРЕНГЕРА

Под термином «энергоразделение» или «безмашинное энергоразделение» понимается перераспределение полной энтальпии (температуры торможения) в потоке газа без совершения им внешней работы и теплообмена с окружающей средой. Причины, вызывающие энергоразделение потока, могут быть различными. В некоторых случаях это вихревые течения, в других случаях это связано с пульсациями давления и возникновением ударных волн [1]. Они легли в основу устройств для энергоразделения потока. Наиболее распространенные среди них - вихревые трубы Ранка-Хилша (ТРХ) и резонансные трубы Гартмана-Шпренгера (ТГШ).

Принцип действия трубы Гартмана-Шпренгера основан на взаимодействии ударной волны с стенками резонатора, что приводит к формированию устойчивой высокоамплитудной волновой структуры и периодическим колебаниям давления [2]. Энергоразделение на основе эффекта Гартмана-Шпренгера реализуется за счёт неравномерного распределения энергии в потоке после резонатора, что позволяет выделить зоны с различными уровнями температуры и давления.

Для проведения исследования разработан экспериментальный стенд на базе малой аэродинамической установки непрерывного действия с регулируемыми геометрическими параметрами (диаметр резонатора, длина, форма сопла) и системой подачи газа с регулируемым давлением и скоростью потока (рис. 1). Установка оснащена как прозрачными окнами из оргстекла, так и ИК-прозрачным иллюминатором из ZnSe, что позволяет измерять температуру модели с помощью ИК-камеры InfraTEC IR8800. Для экспериментального исследования поля скорости потока в дозвуковых и сверхзвуковых струях применяется система PIV на базе измерительного комплекса «Полис» [3]. Для подсветки потока в системе PIV используется зеленый импульсный ND:YAG лазер Beamtech Vlite 200 с двумя рабочими элементами и одним общим оптическим выходом.

В рамках первой части работы проведена серия экспериментов по исследованию структуры течения в дозвуковой струе, а также сравнительный

анализ применимости различных типов трассеров на базе оксида титана и маслокапельной жидкости DEHS. Трассеры вводятся в поток перед соплом, давление воздуха от трассы высокого давления регулируется с помощью редуктора. Давление и температура торможения измеряются перед входом в сопло.

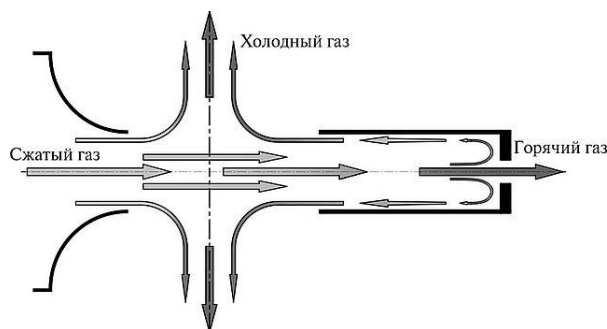


Рис. 1. Устройство для безмашинного энергоразделения на основе трубы Гартмана – Шпренгера

Работа выполняется в рамках гос. бюджетной тематики (№АААА-А19-119012990115-5).

Список литературы

1. Здитовец А.Г., Попович С.С., Киселёв Н.А., Виноградов Ю.А. Экспериментальное исследование способов безмашинного энергоразделения однофазного сжимаемого потока // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2024. Т. 25, № 6. С. 1–30.
2. Raman G., Srinivasan K. The powered resonance tube: From Hartmann's discovery to current active flow control applications // Progress in Aerospace Sciences. 2009. V. 45. N. 4. — P. 97–123.
3. Егоров К.С., Загайнов И.А., Попович С.С. Экспериментальная отработка панорамного метода исследования анемометрии по изображениям частиц на сверхзвуковой аэродинамической установке // Будущее машиностроения России. 2022: сб. докл. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2023. С. 12-16.

I.A. Zagainov ^{1,2}, S.S. Popovich ²

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

² Lomonosov Moscow State University Research Institute of Mechanics,
Michurinsky Prospekt 1, Moscow, 119192, Russia

PROBLEM STATEMENT OF EXPERIMENTAL STUDY OF THE HARTMANN-SPRENGER ENERGY SEPARATION EFFECT

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ В ОТРЫВНЫХ ТЕЧЕНИЯХ СЖИМАЕМОГО ГАЗА

В области высокоскоростных внутренних течений в каналах и трактах перспективных двигательных и энергетических установок актуальным представляется учёт при определении теплового потока и коэффициента теплоотдачи локальных изменений определяющей температуры – равновесной (адиабатной) температуры стенки и коэффициента восстановления температуры. Как показано в ряде работ [1], погрешность в определении коэффициента теплоотдачи, рассчитанного без учета локальных изменений равновесной температуры стенки, может составлять до 50%. При этом, например, в турбостроении погрешность в 20% приводит к ошибке в определении температуры металла турбинной лопатки около 15 К, а повышение температуры стенки на 30 К может приводить уже к значительному уменьшению ресурса лопатки.

Целью исследований в данной случае являлось определение закономерностей изменения равновесной температуры стенки и коэффициента теплоотдачи при отрыве пограничного слоя в результате падения скачка уплотнения на стенку. Исследования проводились на сверхзвуковой аэродинамической установке периодического действия с закрытой рабочей частью и регулируемым сверхзвуковым соплом [2]. Размеры рабочей секции: длина – 200 мм, ширина – 70 мм, высота – 98 мм. Число Рейнольдса, рассчитанное по длине нарастания динамического пограничного слоя от критического сечения сопла, составляло не менее $2 \cdot 10^7$ на срезе сопла, что свидетельствует о турбулентном режиме течения. Толщина пограничного слоя в начале рабочей секции на верхней и нижней стенках составляла около 6 мм. Установка оснащена как оптическими кварцевыми окнами, так и ИК-прозрачным иллюминатором из ZnSe, что позволяло измерять температуру нижней и боковых поверхностей рабочей секции с помощью ИК-камеры InfraTEC 8800.

Тепловой поток определялся решением обратной задачи теплопроводности при измерении с помощью ИК-камеры темпа охлаждения предварительно нагретой стенки. Пластина в начальный момент времени была нагрета до 55 градусов. Распределение продольной и поперечной составляющей скорости потока в области взаимодействия падающей ударной волны с плоской стенкой определялось с помощью метода PIV (Рис. 1). В качестве трассеров использовались аэрозольные частицы DEHS после генератора аэрозоля

Dantech. Также проведена визуализация картины течения в области взаимодействия падающей ударной волны со стенкой с помощью теневого прибора Теплера ИАБ-451.

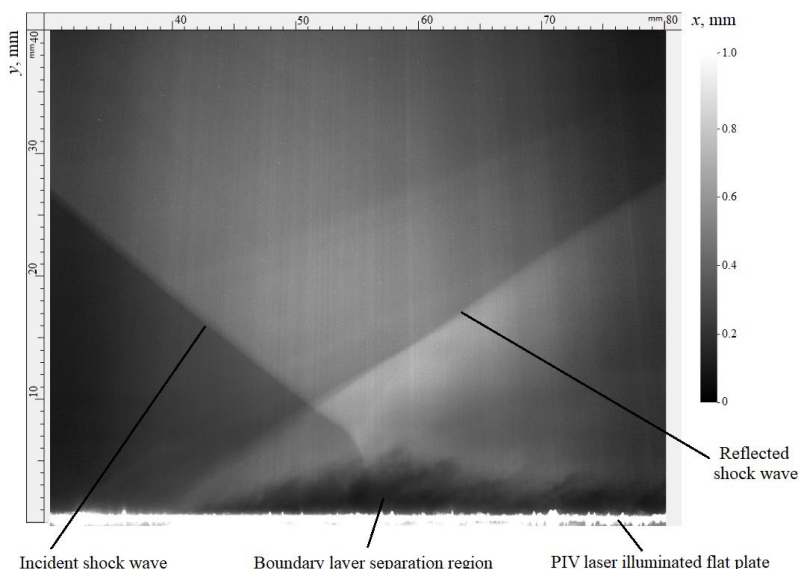


Рис. 1. Теневой снимок области отрыва пограничного слоя при падении скачка уплотнения на стенку [2]

Работа выполнена при поддержке гранта РФ №23-19-00096.

Список литературы

1. Леонтьев А.И., Попович С.С., Лущик В.Г., Макарова М.С. Коэффициент восстановления температуры в сжимаемом турбулентном пограничном слое // Теплофизика высоких температур. 2022. Т. 60, № 3. С. 455–480.
2. Popovich S.S., Zditovets A.G., Kiselev N.A., Vinogradov U.A. Experimental study of aerodynamic heating in the region of an incident shock wave boundary layer interaction // *Acta Astronautica*. 2025. Vol. 229. P. 804-813.

I.A. Zagainov¹, S.S. Popovich¹

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

EXPERIMENTAL STUDY OF HEAT TRANSFER IN SEPARATED FLOWS OF A COMPRESSIBLE GAS

С. Л. Щелоков, С. А. Васильевский, А. Ф. Колесников

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского Российской академии наук
Россия, 119526, Москва, просп. Вернадского, д.101, корп.1

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДОЗВУКОВЫХ СТРУЙ ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНОГО ВОЗДУХА В ОБЛАСТИ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ ВЧ-ПЛАЗМОТРОНА ВГУ-4

Индукционный плазмотрон ВГУ-4 (<https://www.ckp-rf.ru/usu/441568>) позволяет исследовать термохимическую стойкость материалов для условий, моделирующих вход затупленных тел в атмосферу. Важным элементом таких исследований является численное моделирование течений плазмы в разрядном канале плазмотрона и диссоциированного газа в струе, обтекающей модель, для условий экспериментов.

Проведено численное исследование течений дозвуковых высокоэнтальпийных струй воздуха, формируемых в разрядном канале ВЧ-плазмотрона ВГУ-4 диаметром 80 мм, при обтекании цилиндрической модели диаметром 50 мм с закругленной кромкой радиуса 11 мм. Рассмотрены рабочие параметры установки в диапазоне мощностей анодного питания ВЧ-генератора 30–70 кВт и давлений в барокамере 50–200 мбар. Для моделирования течения равновесной плазмы воздуха в разрядном канале использованы уравнения Навье-Стокса и уравнения Максвелла для высокочастотного электромагнитного поля. Течение дозвуковой струи диссоциированного воздуха при обтекании модели рассчитывается на основе уравнений Навье-Стокса с учетом влияния закрутки, т.е. с учетом тангенциальной компоненты скорости. Проведено сравнение расчетных данных, полученных с учетом и без учета тангенциальной компоненты скорости.

Установлено, что закрутка потока слабо влияет на течение в высокотемпературном ядре струи, но заметно сказывается на параметрах потока на внешней границе пограничного слоя вблизи модели (рис.1). С увеличением мощности, вкладываемой в разряд, влияние закрутки на течение в пограничном слое и на тепловой поток к модели в точке торможения уменьшается.

В рассмотренной области рабочих параметров установки на выходе из разрядного канала реализуется диапазон энтальпий 25.8 - 52.3 МДж/кг, а на внешней границе пограничного слоя на модели - 21.5 - 40.5 МДж/кг.

Работа выполнена в рамках Государственного задания 124012500440-9.

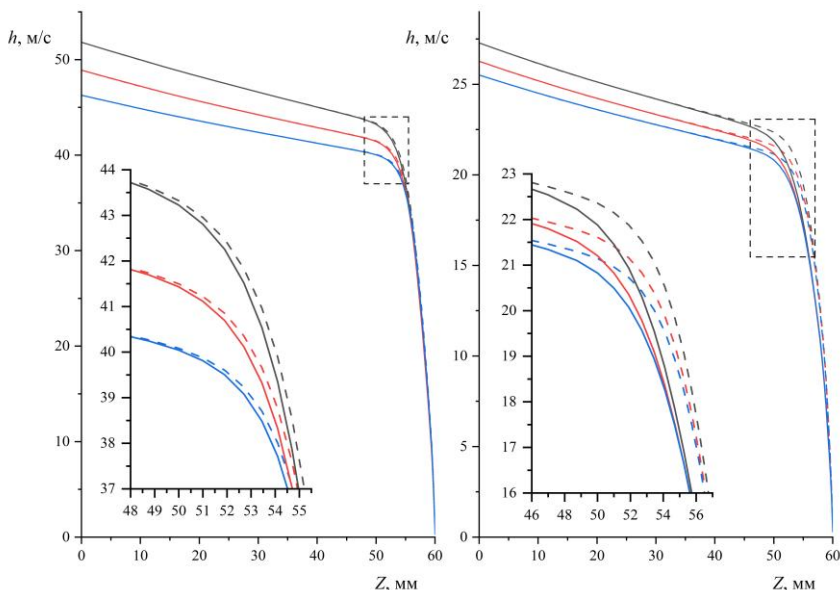


Рис. 1. Распределения энthalпии $h(z)$ вдоль оси симметрии при $N_{ap}=30$ кВт (справа), $N_{ap}=70$ кВт (слева). Черным, красным, синим показаны результаты для давлений 50, 100, 200 мбар. Штриховые кривые – расчеты без учета закрутки.

Список литературы

1. Patankar S.V., Spalding D.B. Heat and mass transfer in boundary layers. London: Intertext Books. 1970.
2. Vasil'evskii S.A., Kolesnikov A.F., Bryzgalov A.I., Yakush S.E. Numerical simulation of equilibrium air plasma flow in the induction chamber of a high-power plasmatron. Continuum Mechanics and Thermodynamics. 2023. V. 35. No. 4. P. 1689-1701.
3. Васильевский С.А., Колесников А.Ф. Влияние закрутки потока на дозвуковую струю воздуха в ВЧ-плазматроне ВГУ-4 // Изв. РАН. МЖГ. 2024. № 5. С. 119–127.
4. Колесников А. Ф., Щелоков С. Л. Анализ условий моделирования аэродинамического нагрева в дозвуковых струях высокоэнтальпийного воздуха ВЧ-плазматрона ВГУ-4 // Изв. РАН. МЖГ. 2021. №. 2. С. 91-96.

S. L. Shchelokov, S. A. Vasil'evskii, A. F. Kolesnikov

Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences
Russia, 119526, Moscow, Prospekt Vernadskogo, 101-1

**NUMERICAL STUDY OF SUBSONIC HIGH-ENTHALPY AIR
JETS IN THE OPERATING ENVELOPE OF THE RF PLASMA
TORCH VGU-4**

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ВОЗДУХА В ВЕНТИЛИРУЕМОМ ПРОСТРАНСТВЕ ПРИ ПОДАЧЕ ПРИТОЧНОЙ СТРУИ ЧЕРЕЗ ОСЦИЛЛЯТОР

Подача воздуха в вентилируемые пространства обычно осуществляется через диффузоры с постоянным, не изменяющимся со временем, расходом приточного воздуха. Для повышения эффективности перемешивания воздушной среды можно организовать вынужденную генерацию колебаний расхода приточного воздуха. В работе [1] предложено организовать подачу воздуха в тестовое вентилируемое пространство через осциллятор с упрощенной геометрией. В осцилляторе формировались автоколебания, порождающие колебания приточного расхода и направление подачи струи. В настоящей работе проведено сопоставление параметров течения и теплообмена для задач с постоянным расходом приточного воздуха (стационарная подача приточного воздуха) и переменным (нестационарная подача приточного воздуха), который формируется при использовании осциллятора.

Моделирование течения и теплообмена выполнено в 2D постановке. Геометрические характеристики осциллятора взяты в соответствии с [1] и показаны на рис. 1а: размеры входного и выходного отверстия совпадают $d = 0.04$ м. Осциллятор установлен в центре вертикальной границы вентилируемого пространства (тестового помещения), на рис. 1б в масштабе показана геометрия расчетной области. Выходное отверстие высоты $5d$ располагалось вблизи пола помещения, его положение варьировалось, пример расположения отверстия показан на рис. 1б.

Воздух рассматривается как несжимаемая среда. Скорость подачи струи V_0 варьируется от 2 до 20 м/с, соответствующие значения чисел Рейнольдса $Re = dV_0/\nu = (5...50) \times 10^3$. В начальный момент времени температура воздуха в помещении задавалась равной 36°C , а температура охлаждающей струи – 20°C . Решалась задача установления течения в случае стационарной и нестационарной подачи приточного воздуха.

В расчетах использовалась сетка со сгущением ко входному и выходному отверстию общей размерностью 200 тысяч ячеек. Расчеты выполнены на основе URANS подхода с использованием модели $k-\omega$ SST. Шаг по времени задавался равным 3×10^{-3} с. Расчеты проведены в пакете ANSYS Fluent с использованием ресурсов СКЦ «Политехнический».

Картина течения в осцилляторе показана на рис. 1а: поток воздуха совершает колебания внутри смесительного канала, периодически прилипая к его верхней и нижней стенке. На рис. 1в представлено изменение поперечной скорости V_y в точке на входе в помещение за два периода колебаний T . Для представленного на рис. 1 варианта задачи ($V_0 = 4$ м/с) период колебаний T составил 2.05 с.

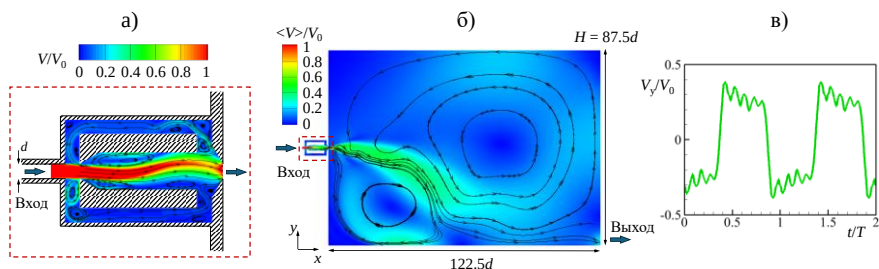


Рис. 1. Поле скорости а) в осцилляторе и б) в помещении, в) изменение V_y в приточном отверстии, показанное за время $2T$, вариант $V_0 = 4$ м/с

Проведено сопоставление параметров течения и теплообмена, полученных в случае стационарной и нестационарной подачи приточного воздуха (рис. 1б). Показано, что нестационарная постановка задачи обеспечивает лучшее перемешивание потока и позволяет получить более однородные параметры течения и теплообмена на всем протяжении процесса установления. При стационарной подаче воздуха в начальные моменты времени охлаждающая струя формирует локальную область (около четверти объема помещения) с пониженными значениями температуры, остальная часть помещения охлаждается постепенно.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ (№ 24-19-00437).

Список литературы

1. Liang B., Wang H. A preliminary research on the periodic characteristics of a ventilation system with fluid oscillator // E3S Web of Conferences, 2022. Vol. 356. 01068. 4 p.

T.S. Korskova, M.A. Zasimova

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

NUMERICAL STUDY OF AIR MIXING IN A VENTILATED SPACE WHEN AIR JET IS SUPPLIED THROUGH AN OSCILLATOR

*Ю.К. Руденко¹, А.В. Пуштаев¹, Н.А. Винниченко¹, Ю.Ю. Пласина¹,
А.В. Уваров¹*

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
физический факультет, Москва, 119991, Ленинские горы, 1/2

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МЕЖФАЗНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ПОМОЩЬЮ ЛОКАЛЬНОГО ИК-НАГРЕВА

Анализ процессов тепло- и массообмена вблизи поверхности жидкости при локальном нагреве важен с точки зрения обработки и очистки поверхности, применяется в целях экологического контроля. Инфракрасный лазер CO₂ с длиной волны 10.6 мкм и глубиной поглощения в воде порядка нескольких десятков микрон оказывается удобным способом локального поверхностного нагрева. Создаваемые с помощью ИК-лазера «тепловые маркеры» позволяют проводить диагностику движения жидкости на поверхности в натурных геофизических экспериментах [1]. Также применение локального нагрева может использоваться как вариант «бесконтактного пинцета» для перемещения частиц на поверхности [2]. В результате действия лазерного излучения происходит нагрев приповерхностной области и развивается конвективное течение, приводящее к расплыванию теплового пятна. В зависимости от наличия примесей на поверхности механизм конвекции определяется или преимущественно термокапиллярным эффектом, или взаимодействием термокапиллярного и концентрационно-капиллярного эффектов. В некоторых жидкостях (например, в дистиллированной воде) термокапиллярный механизм конвекции блокируется пленкой ПАВ на поверхности, и конвективное течение происходит за счет перераспределения давления в объеме жидкости [3]. Поля температуры на поверхности, давления и скорости течения существенно отличаются для разных механизмов конвекции.

Для изучения поверхностных свойств жидкости в работе осуществлялся локальный нагрев поверхности различных жидкостей с помощью инфракрасного лазера CO₂ с длиной волны 10.6 мкм. С помощью ИК-термографии регистрировались поля температуры поверхности. Методом Moon-Glade BOS [4] измерялся рельеф поверхности, который позволяет оценить величину изменения давления в зоне нагрева. В работе использовались различные жидкости: дистиллированная вода и глицерин, на поверхности которых образуются пленки ПАВ, этанол и силиконовое масло различной вязкости, в которых термокапиллярный механизм не блокируется поверхностной пленкой. Экспериментально полученные поля температуры и рельефа поверхности сравнивались с численными расчетами. В работе показано, что течение

при наличии поверхностной пленки соответствует условию прилипания на поверхности. Термокапиллярный механизм конвекции описывается условием Пирсона.

Для нестационарной задачи расплывания теплового пятна при локальном нагреве поверхности с различными граничными условиями были получены уравнения в автомодельных переменных. Анализ автомодельных переменных позволяет оценить скорость расплывания теплового пятна и сравнить разные механизмы: термокапиллярную конвекцию и горизонтальную конвекцию, связанную с перераспределением давления.

В работе показано, что скорость расплывания пятна при наличии термокапиллярной конвекции на порядок больше, а максимум температуры меньше, чем в случае горизонтальной конвекции за счет перераспределения давления. Рельеф поверхности отличается для разных механизмов конвекции. Хорошее совпадение численных результатов и экспериментальных данных говорит о правильном выборе граничных условий для жидкостей с различной структурой поверхности.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00591. Было использовано оборудование, приобретенное за счет средств Программы развития Московского университета. Работа Ю.К. Руденко также была поддержана Фондом развития теоретической физики и математики “Базис” (грант № 22-2-2-5-1).

Список литературы

1. Veron F., Melville W.K. Experiments on the stability and transition of wind-driven water surfaces // J. Fluid Mech. 2001, Vol. 446, P. 25-65.
2. Mallea R.T., Bolopion A., Beugnot J.C., Lambert P., Gauthier M. Laser-induced thermocapillary convective flows: a new approach for noncontact actuation at microscale at the fluid/gas interface // IEEE/ASME Trans. Mechatron. 2017. V. 22. № 2. pp. 693-704.
3. Rudenko Yu.K., Vinnichenko N.A., Plaksina Yu.Yu., Pushtaev A.V., Uvarov A.V. Horizontal convective flow from a line heat source located at the liquid–gas interface in presence of surface film // J. Fluid Mech. 2022, Vol. 944.
4. Vinnichenko N.A., Pushtaev A.V., Plaksina Yu.Yu., Uvarov A.V. Measurements of liquid surface relief with Moon-Glade Background Oriented Schlieren technique // Exp. Thermal Fluid Sci. 2020, Vol. 114, P. 110051.

***Yu.K. Rudenko¹, A.V. Pushtaev¹, N.A. Vinnichenko¹, Yu.Yu. Plaksina¹,
A.V. Uvarov¹***

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

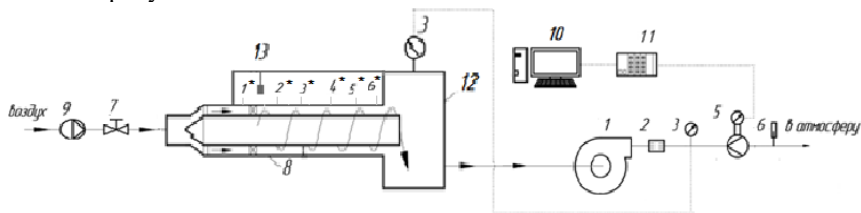
**INVESTIGATION OF INTERFACIAL PROPERTIES USING
LOCALIZED INFRARED HEATING**

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

В современном мире значительное внимание уделяется повышению энергоэффективности теплоэнергетических аппаратов, одним из основных решений которой является модернизация теплообменного оборудования через интенсификацию теплообмена. Одним из пассивных методов интенсификации является закрутка потока теплоносителя.[2].

Однако стоит учитывать, что затраты энергии на перемещение закрученных потоков значительно выше, чем на перемещение осевого потока. [1]. При этом дополнительные затраты энергии возникают как в самом закручивающем устройстве, так и по длине кольцевого канала. В закручивающем устройстве дополнительные потери связаны с местным сужением потока, изменением его направления, появлением вихревых структур и увеличением поверхности трения о лопасти закручивателя. Из-за достаточно сложного характера воздействия закрученного потока на потери энергии единственным способом его определения является физический эксперимент.

Экспериментальный стенд для исследования полного сопротивления применяемый в данной работе основан на измерении статического давления и полного давления. Принципиальная схема экспериментального стенда представлена на рисунке 1.



- 1 – вентилятор; 2 – устройство подготовки потока; 3 – датчик давления; 4 – нормальная диафрагма; 5 – датчик дифференциального давления; 6 – датчик температуры; 7 – ирисовый клапан; 8 – модель кольцевого канала с аксиально-лопаточным завихрителем; 9 – генератор дыма; 10 – компьютер оператора; 11 – система сбора данных; 12 – резервуар; 13 – напорная трубка, 1*, 2*, 3*, 4*, 5*, 6* - точки измерения по длине трубы.

Рис. 1. Схема экспериментального стенда

Для локальной закрутки потока в начале кольцевого канала применён аксиально-лопаточный завихритель с поворотным механизмом, позволяющий изменять в процессе работы начальный угол закрутки от 0° до 90° . Полное давление снималось при помощи напорной трубки, скорость измерялась при помощи лазерного доплеровского анемометра (ЛДА).

На рисунке 1 представлено распределение полного давления закрученного потока по длине кольцевого канала. Из графика можно наблюдать, что полное давление уменьшается с увеличением расстояния вдоль канала. В начале канала давление значительно выше и резко снижается по мере движения потока. Далее наблюдается стабилизация давления с незначительными колебаниями, что может свидетельствовать о стабилизации течения. В отдельных точках, вероятно, возникают местные повышения давления, связанные с вихревыми структурами.

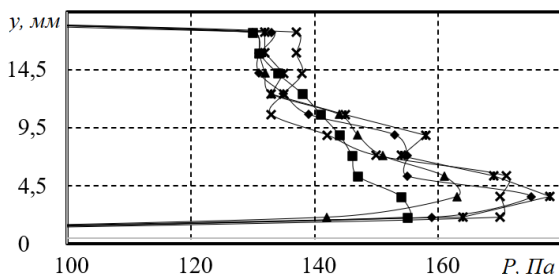


Рис. 2. Распределение полного давления по длине кольцевого канала

Таким образом, распределение давления показывает явное снижение на протяжении канала, что указывает на потери энергии в процессе закрутки потока.

Список литературы

1. Троянкин Ю.В. Аэродинамическое сопротивление и совершенство циклонной камеры / Ю.В. Троянкин, Е.Д. Балуев // Теплоэнергетика. – 1969. – № 06. – С. 26-32.
2. Щукин В.К. Теплообмен и гидродинамика внутренних потоков в полях массовых сил. – 2-е изд., перераб. и доп. / В.К. Щукин. – М: Машиностроение, 1980.

V.A. Orishina ¹, E.V. Pankratov ¹

¹ Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov,
Russia, 163000, Arkhangelsk, st. Northern Dvina embankment, 17

STUDY OF AERODYNAMIC RESISTANCE OF SWIRLING FLOW WITH PAIRED SPIRAL-VORTEX STRUCTURE IN AN ANNULAR CHANNEL

СЕКЦИЯ 2

Тепло- и массообмен в двухфазных и
многофазных потоках

**ВЛИЯНИЕ ПОЛИДИСПЕРСНОСТИ НАНОЧАСТИЦ НА
ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ НАНОЖИДКОСТЕЙ**

Появление наножидкостей как теплоносителей нового типа требует уточнения их теплопроводности, что связано с применением различных методов и устройств для идентификации теплопроводности одних и тех же наножидкостей, а также ввиду высокой их чувствительности и зависимости от исходных образцов. Способы получения наножидкостей не обеспечивают монодисперсность наночастиц: получение монодисперсных наночастиц практически невозможно [1].

Сложность интерпретации опытных данных из-за измерительных трудностей запустила генерацию моделей, объясняющих увеличение теплопроводности наножидкостей [2], но без учета полидисперсности наночастиц. Поэтому необходима оценка влияния полидисперсности наночастиц на величину теплопроводности наножидкостей, используя имеющиеся теоретические и экспериментальные наработки.

Для этого по аналогии с нормированной счетной функцией плотности распределения наночастиц по размерам

$$f_N(l) = dn(l)/(Ndl),$$

где $dn(l)$ – число частиц фракции dl ; N – общее число наночастиц в системе, введена функция плотности распределения объемной доли наночастиц в наножидкости по размерам

$$f_\Phi(l) = d\varphi(l)/(\varphi_0 dl),$$

где $d\varphi(l)$ – объемная доля наночастиц фракции dl ; φ_0 – объемная доля всех наночастиц в наножидкости, и найдена связь между ними $f_N(l) = V\varphi_0 f_\Phi(l)/(k_V l^3 N)$, где k_V – коэффициент формы наночастиц; V – объем базовой жидкости. В безразмерном виде эта связь имеет вид $F_\Phi(L) = L^3 F_N(L)$, где $L = l/\bar{l}$; $F_N(L) = \bar{l} f_N(l)$; $F_\Phi(L) = \bar{l} f_\Phi(l)$, $\bar{l}$ – среднечисленный размер наночастиц в наножидкости. Безразмерная счетная функция плотности распределения наночастиц по размерам, как правило, имеет Гауссовский вид

$$F_N(L) = \frac{1}{\bar{\sigma}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(L-1)^2}{2\bar{\sigma}^2}\right],$$

где $\bar{\sigma} = \sigma/\bar{L}$, σ - среднеквадратическое отклонение от 1.

Это позволило, взяв за основу соотношение для прогнозирования теплопроводности [3], модифицировать его, учтя в явном виде в нем полидисперсность наночастиц

$$\lambda_{nf}(L)/\lambda_{bf} = 1 + \frac{2Ck_B T l_f}{\pi \mu_{bf} \bar{L}^3 \lambda_{bf} L^3} \cdot \frac{\varphi_0 \int_0^\infty F_\Phi(L) dL}{1 - \varphi_0 \int_0^\infty F_\Phi(L) dL},$$

где λ_{nf} , λ_{bf} - теплопроводности наножидкости и базовой жидкости; k_B - постоянная Больцмана; C - эмпирическая константа; T - температура; l_f , μ_{bf} - диаметр молекулы и динамическая вязкость базовой жидкости.

Для наножидкости с монодисперсными наночастицами

$$\lambda_{nf}(1)/\lambda_{bf} = 1 + \frac{2Ck_B T l_f}{\pi \mu_{bf} \bar{L}^3 \lambda_{bf}} \cdot \frac{\varphi_0}{1 - \varphi_0}.$$

Вычислительными экспериментами установлено, что полидисперсность наночастиц существенно увеличивает теплопроводность наножидкостей.

Список литературы

1. Devaraj N.K., Han T.C., Oug B.H., Sin Y.K. Synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles for thermoelectric application // Mater. Res. Innov. – 2014. – V.18. – (S6-350-S6-353).
2. Lee J.H., Lee S.H., Choi C., Jang S., Choi S. A review of thermal conductivity data, mechanisms and models for nanofluids // Int. J. Micro-Nano Scale Transp. 2010. – V.1. – №4. – pp.269-322.
3. Kumar D.H., Patel H.E., Kumar V.R., Sundararajan T., Pradeep J., Das S.K. Model for heat conduction in nanofluids // Phys. Rev.Lett. – 2004. – V.93(14). – 144301.

A.V. Ryazhskikh, A.A. Khvostov, E.A. Soboleva

Voronezh State Technical University,
Russia, 394006, Voronezh, 20th of October St., 84

INFLUENCE OF NANOPARTICLE POLYDISPERITY ON THE THERMAL CONDUCTIVITY OF NANOFLUIDS

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОВОДИМОСТИ ПУЛЬСИРУЮЩЕЙ ТЕПЛОВОЙ ТРУБЫ МЕТОДОМ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ

Пульсирующие тепловые трубы (ПТТ) представляют собой большой интерес в качестве устройств для отведения тепла, в объеме которых, рабочее тело представляет из себя двухфазный поток жидкости и газа. Такая тепловая труба состоит из трёх частей - испарителя, холодильника и адиабатической секции, а сама трубка имеет серию витков и частично заполнена рабочей жидкостью. Постоянно формирующиеся пузырьки газа, расширяясь, выталкивают жидкость, и перемещаясь вместе с ней в холодную зону, конденсируются, уменьшаясь в объеме, процесс повторяется.

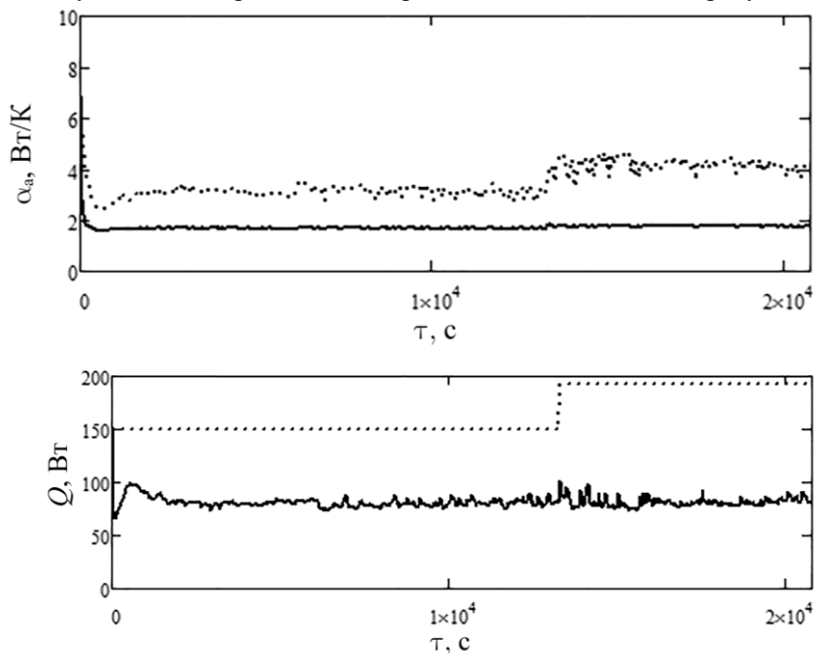
Однако, составление модели для описания данного потока является нетривиальной задачей. Для её решения можно провести эксперимент и на основе выходных данных восстановить теплопроводность трубы при помощи решения обратной задачи идентификации. Итерационным способом восстанавливается проводимость трубы путем добавления приращения к изначальному значению характеристики и сведению к минимуму температурной невязки между восстанавливаемой моделью и экспериментальными данными. В эксперименте участвовала ПТТ в горизонтальном положении в поле сил тяжести, в качестве рабочего тела выступал ацетон.

Для решения задачи используется модель с сосредоточенными параметрами из двух узлов: испаритель и конденсатор, которые связаны между собой трубкой, имеющей тепловое сопротивление R . Вводится временная сетка, каждую точку которой представляют температуры узлов, зафиксированные в эксперименте. Для регуляризации решения применяется вариационно-итерационный метод.

В конденсаторе же, приращение тепловой мощности происходит из-за повышения на нем температуры. Таким же образом можно рассчитать рассеиваемую тепловую мощность конденсатором. Массы испарителя и конденсатора приняты за 0.1 кг, удельная теплоёмкость материала равняется 920 Дж/кг*К. В эксперименте тепловая нагрузка на испарителе разделена на два этапа: сначала 150 Вт, затем 193 Вт. При этом рост нагрузки не вызывает роста восстановленной проводимости, в отличии от предельной.

Согласно расчетам, функционал температурной невязки сводится к минимуму уже на первой итерации.

Результаты расчета представлены на рисунке 1.



Пунктирные линии – предельные величины, сплошные - восстановленные

Рис. 1. Восстановленные тепловая проводимость и теплового потока

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-49-10060

Список литературы

1. Викулов А.Г., Ненарокомов А.В. Вариационный метод идентификации тепловых математических моделей с сосредоточенными параметрами // ТИПТ. 2016. №5. С. 214-226.

A.A. Sudurov¹

¹ Moscow Aviation Institute
125993, Moscow, Volokolamskoye shosse, 4

DETERMINATION OF THE CONDUCTIVITY OF A PULSATING HEAT PIPE BY SOLVING AN INVERSE PROBLEM

¹О.О.Мильман, ¹А.П. Железнов, ¹А.В.Птахин, ²Г.Г.Яньков, ¹А.Ю.Картуесова,
¹В.С.Крылов

¹ЗАО «НПВП «Турбокон», Россия, 248010, Калуга, Комсомольская роща 43

²НИУ «Московский энергетический институт», Россия, 111250, Москва, Краснозарменная ул., д. 14

ВЛИЯНИЕ НАКЛОНА ТРУБЫ НА ТЕПЛООБМЕН ПРИ ПОЛНОЙ КОНДЕНСАЦИИ ФРЕОНА R245FA В ТРУБЕ

Конструктивное оформление теплообменных аппаратов для конденсации органических теплоносителей связано с выбором типа теплообменного пучка: горизонтальный, наклонный, вертикальный. От этого выбора зависит интенсивность процесса конденсации, конструкция и габариты теплообменника, условия его присоединения к связанным технологическим установкам. Методика расчета и проектирования теплообменных аппаратов изложена в ряде справочников. Для случая наклонных труб имеются отдельные исследования, которые не дают общего представления о методике расчета и проектирования таких аппаратов.

Таким образом, систематизированные данные для расчета и проектирования таких аппаратов не достаточны, и для конкретного случая рекомендуется проведение экспериментов, обеспечивающих надежные данные.

1. Экспериментальный стенд для исследования конденсации

Схема экспериментального стенда приведена на рис. 1. Он состоит из парогенератора 1 с электроподогревом, пар фреона по линии 2 с пароперегревателем поступает в рабочий участок 3, конденсируется в нем, конденсат стекает в парогенератор. Весь процесс протекает в режиме естественной циркуляции, в котором расход фреона определяется подведенной мощностью в парогенераторе.

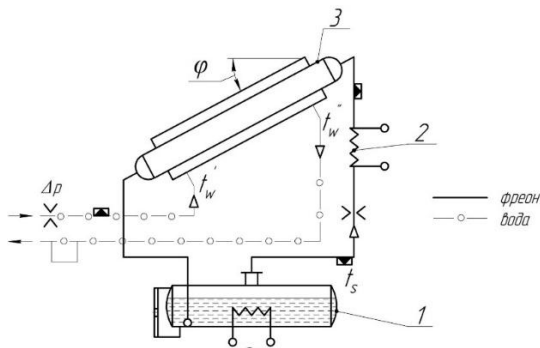


Рис.1 – Схема экспериментального стенда

2. Результаты испытаний

На рис. 2 приведена зависимость среднего по длине трубы коэффициента теплоотдачи, рассчитанного по формуле (1) от массовой скорости

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i}{n} \quad (1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи i – того участка теплообменной трубы;
 n – количество участков.

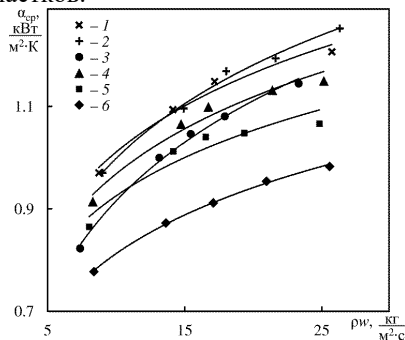


Рис.2 - Зависимость среднего коэффициента теплоотдачи фреона от массовой скорости

На всех углах наклона теплообменной трубы $\bar{\alpha}$ увеличивается с ростом массовой скорости пара, при том, что линейная скорости увеличивается, однако не так быстро как массовая из-за роста давления фреона при полной конденсации его в трубе. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант №22-19-00495).

Список литературы

1. Rifert V. G., Sardak A. I., Tobilevich A. N. Flow modes of phase and heat transfer during vapour condensation inside horizontal tubes //Izv. Akad. Nauk SSSR. - 1985. -Т. 4. - С. 101-109.

¹O.O.Milman, ¹A. P. Zheleznov, ¹A.V.Ptahin, ²G.G.Yankov, ¹A.Y.Kartuyesova,
¹V.S.Krylov

¹ZAO NPVP Turbocon, Russia, 248010, Kaluga, Komsomolskaya rosha 43

²NIU Moscow Power Engineering Institute, Russia,111250, Moscow, Krasnoka-zarmennaya 14

**THE EFFECT OF PIPE INCLINATION ON HEAT TRANSFER
DURING COMPLETE CONDENSATION OF R245FA FREON IN
THE PIPE**

А.А. Арестова¹, Д.А. Олексюк¹, Е.А. Вертиков¹

¹ НИЦ «Курчатовский институт»,
Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

СРАВНЕНИЕ РАВНООБЪЕМНОЙ И РАВНОМАССОВОЙ МОДЕЛЕЙ МЕЖКАНАЛЬНОГО ОБМЕНА В ЯЧЕЙКОВОЙ ПРОГРАММЕ SC-INT

На сегодняшний день в атомной энергетике теплогидравлический расчет активной зоны ядерного реактора проводится с помощью ячейковых программ. Они позволяют с высокой точностью определять параметры активной зоны с минимальными по сравнению с CFD-кодами временными ресурсами. Наиболее известные отечественные ячейковые программы: ТИГРСЦ, ПУЧОК-1000, SC-INT [1].

В основе ячейковых теплогидравлических кодов лежит система уравнений сохранения массы, импульса и энергии, требующая для решения набор замыкающих соотношений и модели для таких явлений как: турбулентное перемешивание, теплопередача, трение на стенке и др. При задании турбулентного перемешивания важно определить способ обмена между ячейками расчетной модели. Все вышеперечисленные программы реализуют обмен равными массами (равномассовую модель). Однако существуют программы, реализующие обмен равными объемами (равнообъемная модель): MATRA [2], ASSERT-4 [3], CTF [4]. В первом случае происходит только передача тепловой энергии и количества движения, а во втором случае – передача энергии, количества движения и массы.

Расчеты на стадии эскизного проекта новых перспективных сборок показывают значительные паросодержания на выходе из ТВС. Кроме того, обоснованы незначительные паросодержания и в реакторах ВВЭР-1000. Сравнение программ COBRA-IV и ASSERT-4 показало, что с использованием равнообъемной модели результаты теплогидравлического расчета лучше приближаются к экспериментальным данным [4].

Рассматривая течение однофазного теплоносителя, который можно считать в первом приближении несжимаемым, для нас не имеет значения какую модель использовать. Однако для двухфазного теплоносителя корректнее использовать равнообъемную модель турбулентного переноса, что будет соответствовать теории турбулентности Прандтля.

В [5] было показано, что в ячейковых программах модель турбулентности занимает центральную позицию. От выбора модели турбулентности в значительной степени может зависеть результат определения критического теплового потока. В настоящее время аттестованная программа SC-INT

реализует равномассовую модель. В данном исследовании предлагается задать турбулентное перемешивание теплоносителя на основе равнообъемной модели. Тогда уравнение сохранения массы, например, примет вид:

$$m_{i,j} - m_{i,j-1} + \Delta z_j \cdot \sum_{k=1}^{N_k^i} w_{i,j-1/2,k} + \Delta z_j \cdot \sum_{k=1}^{N_k^i} w_{i \leftrightarrow ik,j-1/2}^T = 0 \quad (1)$$

где последнее слагаемое отвечает за турбулентный обмен массой в области течения двухфазного теплоносителя и зависит от локальных значений массового и объемного паросодержаний в обменивающихся ячейках, структуры течения и других параметров.

Предполагается, что использование новой модели в программе SC-INT позволит улучшить совпадение расчета с экспериментальными данными по распределению объемного паросодержания и величине критического теплового потока.

Список литературы

1. Kobzar L.L., Oleksyuk D.A., Semchenkov Y.M. Experimental and computational investigations of heat and mass transfer of intensifier grids. *Kerntechnik*, 2015, Vol. 80, № 4, pp. 349 – 358.
2. Yeon-Jong Yoo, Dae-Hyun Hwang, Dong-Seong Sohn. Development of a Subchannel Analysis Code MATRA Applicable to PWRs and ALWRs // *Journal of the Korean Nuclear Society*. Vol. 31, Num. 3, pp. 314-327, June 1999.
3. R.A. Judd, A. Tahir, M.B. Carver, etc. *ASSERT-4 (Version 1). User's Manual*. September, 1984.
4. A. Tapucu, A. Teyssedou, P. Tye, N. Troche. The Effect of Turbulent Mixing Models on the Predictions of Subchannel Codes // *Nuclear Engineering and Design* 149, pp. 221 – 231, 1994.
5. Коштылек Я., Свитак Ф. Оценка моделей для поперечного массо- и энергообмена при анализе по ячейкам пучков тепловыделяющих стержней // *Сборник докладов семинара СЭВ, г. Будапешт, ВНР, том 2, стр. 775, 1978г.*

A. A. Arestova¹, D. A. Oleksyuk¹, E.A. Vertikov¹

¹ National Research Centre “Kurchatov Institute”,
Russia, 123182, Moscow, Academician Kurchatov square, 1

COMPARISON OF EQUAL-VOLUME AND EQUAL-MASS MODELS OF INTERCHANNEL EXCHANGE IN THE SC-INT SUBCHANNEL PROGRAM

А.А. Акашев¹, А.В. Решетников¹, В.Г. Пастухов¹

¹ Институт теплофизики УрО РАН,
Россия, 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 107а

ЗОНДИРОВАНИЕ ПОЛЯ ДАВЛЕНИЯ В ОКРЕСТНОСТИ СТРУИ В УСЛОВИЯХ ЕЁ ПОЛНОГО РАЗВАЛА

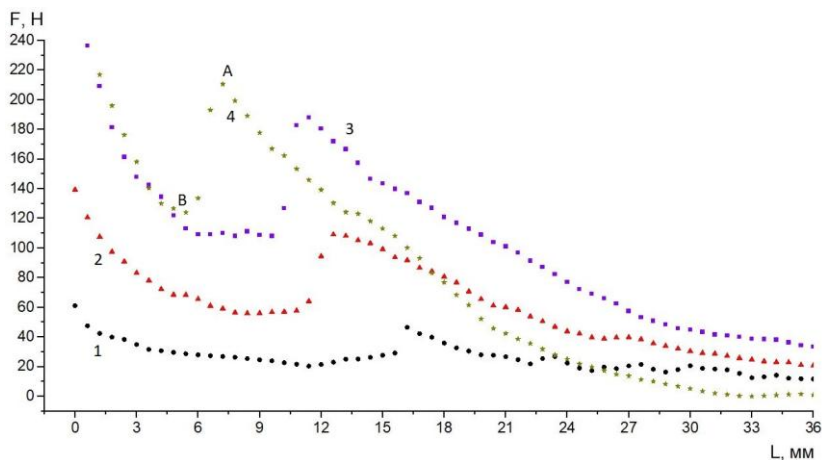
Введение. Струи вскипающих жидкостей используются в различных технических устройствах и ряде технологических процессов, в частности, в микроэлектронике, при охлаждении теплонагруженных элементов, в металлургии и т.д. Важным параметром при применении вскипающих струй является не только охлаждающая способность струи, но и ее силовое воздействие на объекты. При определенных условиях может наблюдаться полный развал струи – веерное распространение потока перпендикулярное оси выходного канала. Полный развал струи обусловлен интенсивным объемным вскипанием (взрывное вскипание) при участии эффекта Коанда.

Организация эксперимента. Проведены опыты по силовому воздействию истекающей воды из камеры высокого давления в атмосферу через короткий цилиндрический канал при температурах в интервале 25 – 275°C. Были реализованы режимы истечения при постоянном давлении 2 и 6 МПа и с линии насыщения в условиях полного развала струи. В качестве преграды были использованы круглые диски различных диаметров, которые размещались на расстоянии 13, 40, 130 см от выхода канала в случае классических струй. В случае разваленной струи, преграда устанавливалась на расстоянии от 10 см до непосредственного контакта с выходным фланцем. Воздействие на преграду фиксировалось при помощи электронных весов, подключенных к ПК.

Результаты. В результате экспериментов выяснено что для холодной или перегретой не более 50°C водяной струи, воздействие на неподвижную преграду остается постоянным для каждого давления, при котором струя истекает. С дальнейшим повышением температуры форма струи изменяется, переходя от, в основном, цилиндрической жидкой сердцевины к парожидкостному конусу. С ростом температуры угол раскрытия струи увеличивается, и часть струи перестает попадать на преграду, как следствие уменьшая воздействие на нее. Таким образом воздействие начинает зависеть от размера преграды и расстояния от неё до сопла.

При перегреве истекающей воды более 110°C струя разваливается и истекает в радиальном направлении, в плоскости выходного фланца. В этом случае в окрестности струи создается область пониженного давления. На рисунке 1 изображен график зависимости силы, действующей на зондирую-

щую плоскость, от расстояния между ней и выходом канала при истечении разваленной струи. Видно, что при приближении преграды к выходному фланцу воздействие притягивающей силы возрастает, затем происходит скачок (например, от А к В на рисунке 1), уменьшающий эту силу, и рост возобновляется, до максимальных значений у выходного фланца.



1 — $T=220^{\circ}\text{C}$; 2 — $T=240^{\circ}\text{C}$; 3 — $T=255^{\circ}\text{C}$; 4 — $T=270^{\circ}\text{C}$

Рис. 1. График зависимости силы притяжения, действующей на зондирующую плоскость со стороны разваленной струи, от расстояния до выходного сечения канала

Этот скачок происходит из-за изменения плоскости, вдоль которой истекает струя. Изначально разваленная струя течет в плоскости выходного фланца, но при приближении преграды на некоторое расстояние, зависящее от температуры истекающей жидкости, струя перескакивает на плоскость преграды и истекает вдоль нее. Выявлена линейная зависимость силы воздействия на преграду от давления насыщения истекающей воды.

A.A. Akashev¹, A. V. Reshetnikov¹, V.G. Pastukhov¹

¹ The Institute of Thermal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia 620016, Ekaterinburg, Amundsen St., 107a

PROBING THE PRESSURE FIELD AROUND A JET UNDER CONDITIONS OF ITS COMPLETE BREAKUP

А.А. Сахаров¹, А.А. Емец¹

¹ Рыбинский государственный авиационный технический
университет имени П. А. Соловьева,
Россия, 152934, Рыбинск, ул. Пушкина, 53

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА НА РАСПЫЛЯЕМУЮ ЖИДКОСТЬ.

Контактные конденсаторы представляют собой высокоэффективные устройства для конденсации водяного пара, используемые в различных промышленных процессах. Они обеспечивают эффективное удаление тепла из паровой фазы, обеспечивая процесс конденсации. Распыленной капли жидкости обеспечивают большую поверхность теплообмена и высокий коэффициент теплоотдачи. Задача расчета контактных конденсаторов является определение расхода требуемого количества подаваемой охлаждающей жидкости и ее дисперсность. Для решения этой задачи необходимо экспериментальное исследование.

Для экспериментального исследования процесса конденсации водяного пара распыленным капельным потоком создан экспериментальный стенд.

Экспериментальный стенд состоит из контактного конденсатора объемом $V_k = 0,036 \text{ м}^3$ с блоком форсунок обеспечивающих равномерное заполнение объема конденсата распыленными каплями воды. Подача пара обеспечивается парогенератором. Система труб из нержавеющей стали Ду32 с вентилями, оснащенная теплоизоляцией. Теплоизоляция состоит из минеральной ваты марки URSA толщиной 50 мм и алюминиевой фольги. Для соединения паровых труб использованы резьбовые соединительные элементы. Образующийся конденсат накапливается в конденсатосборнике емкостью $V_6 = 0,022 \text{ м}^3$, откуда конденсатным насосом фирмы BELAMOS серия XP05L подается в кожухотрубный медный водоводяной теплообменник для дальнейшего охлаждения и подачи через блок форсунок. Другая часть конденсата подается на парогенератор для производства пара. Уровень подаваемого конденсата конденсата измеряется уровнем. Расход охлажденного конденсата измеряется ротаметром. Для оценки дисперсности проведены исследования распыления воды блоком форсунок, определены средние диаметры получаемых капель в зависимости от напора воды перед форсунками, а также определены их скорости в факеле распыления, что позволяет создавать в корпусе конденсатора требуемую плотность распыления.

Выполнен тепловой расчет кожухотрубного медного водоводяного

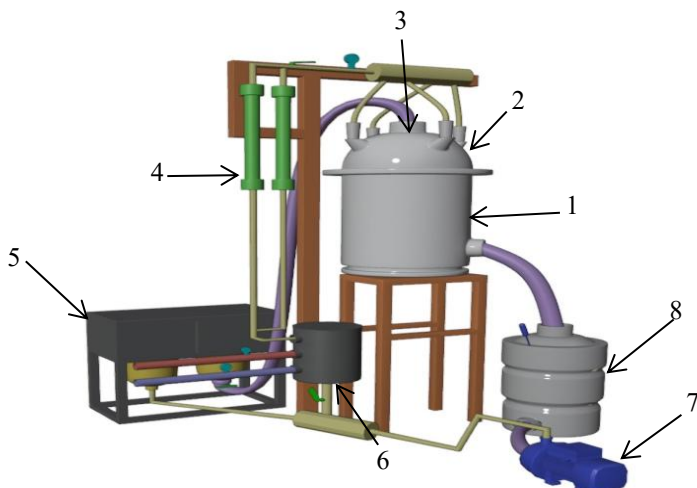


Рис. 1. 3Д модель экспериментальной установки. 1 – контактный конденсатор, 2 – подвод для распыления воды через форсунки, 3 – подвод для подачи пара, 4 – ротаметры, 5 – парогенератор, 6 - теплообменник, 7 – конденсационный насос, 8 – сборник конденсата.

теплообменника, что позволяет задавать температуру охлаждающей воды подаваемой в контактный конденсатор. Установленные термосопротивления позволяют определять температуру конденсата пара и охлаждающей воды. Расход пара замеряется с помощью диафрагмы установленной на паропроводе.

Данная установка позволяет определять объемный коэффициент теплопередачи при конденсации пара в конденсаторе.

Список литературы

1. Бродов Ю. М., Савельев Р. З. Конденсационные установки паровых турбин: Учебн. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1994.— 288 с, ил. ISBN 5-283-00162-8.

A.A. Sakharov¹, A.A. Emets¹

¹ P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University,
Russia 152934, Rybinsk, Pushkin St., 53

**THE EFFECT OF ULTRASOUND ON THE
MANUFACTURING QUALITY OF MAGNETIC FLUID**

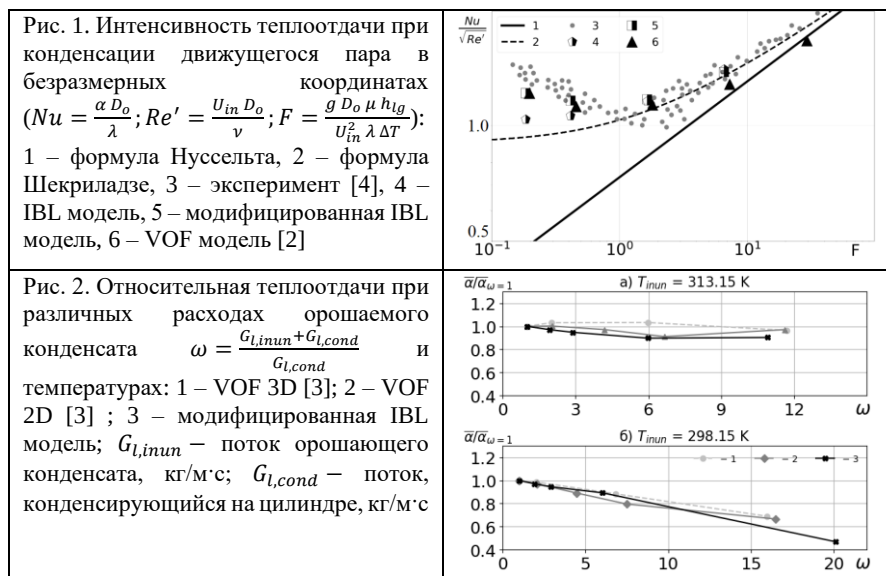
МОДИФИКАЦИЯ ИНТЕГРАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ЖИДКОЙ ПЛЕНКИ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЛЕНОЧНОЙ КОНДЕНСАЦИИ МЕТОДОМ VOF

Методики проектирования промышленных конденсаторов паровых турбин основаны на опыте эксплуатации действующих установок, в которых в качестве рабочего тела используется водяной пар. Однако их применение для конденсации других сред, например фреонов, затруднено из-за значительных различий в теплофизических свойствах этих веществ. Для повышения эффективности проектирования таких конденсаторов целесообразно применять методы численного моделирования. В [1] был предложен подход, основанный на уравнениях Навье-Стокса для парогазовой смеси и модели IBL (Integral Boundary Layer) для описания характеристик пленки конденсата. Однако дальнейший анализ выявил, что модель IBL не учитывает всех особенностей взаимодействия внешнего потока с пленкой конденсата, а также не позволяет корректно описать эффект орошения для веществ с существенно более высоким значением комплекса $c_p \Delta T / h_{lg}$ по сравнению с водяным паром. Здесь c_p – теплоемкость конденсата, Дж/(кг·К); ΔT – недогрев стенки до температуры насыщения, К; h_{lg} – теплота фазового перехода, Дж/кг. В данной работе представлены результаты валидации модифицированной IBL модели, в которой: 1) уточнен критерий уноса капель конденсата с поверхности пленки; 2) скорректировано уравнение энергии для описания эффектов, связанных с орошением трубок пучка конденсатом, стекающим с вышерасположенных труб.

Модифицированная модель валидировалась с привлечением результатов расчётов конденсации паров фреонов на цилиндрах, полученных авторами методом VOF (Volume of Fluid) [2, 3], а также экспериментальных данных [4].

Внесенные изменения в критерий уноса капель позволили предсказать интенсификацию теплообмена при увеличении скорости движущегося пара, что соответствует экспериментальным данным [4], расчеты по модифицированной IBL-модели оказались близки к результатам, полученным методом VOF (рис. 1). Доработка уравнения энергии для пленки в IBL-модели позволила получить согласие с результатами VOF-моделирования (рис. 2). В частности, если орошающий конденсат нагрет до температуры насыщения, его взаимодействие с пленкой приводит к образованию в ней начального термического участка, который оказывает заметное влияние на средний

коэффициент теплоотдачи при конденсации фреонов, что впервые было зафиксировано экспериментально в [5].



Список литературы

1. Minko K.B., Yan'kov G.G., Artemov V.I., Milman O.O. A Mathematical Model of Forced Convection Condensation of Steam on Smooth Horizontal Tubes and Tube Bundles in the Presence of Noncondensables // Int. J. of Heat and Mass Transf. 140, 41–50 (2019).
2. Minko K.B., Artemov V.I., Klement'ev A.A., S.N. Andreev Simulation of Saturated Vapor Condensation from a Downflow on the Surface of a Horizontal Pipe by the VOF Method // Therm. Eng. 70, 988–1002 (2023).
3. Minko K.B., Artemov V.I., Klementiev A.A. CFD simulation of the inundation effect for saturated propane vapor condensation on the surface of a horizontal tube using the volume of fluid method // Int. Com. In Heat and Mass Transf. 154:107432.
4. Lee W.C., Rahbar S., Rose J.W. Film condensation of refrigerant-113 and ethanediol on a horizontal tube – of vapor velocity // J. Heat Transfer. 1984. V. 106.
5. Гогонин И.И. Исследование теплообмена при пленочной конденсации пара // отв. Ред. С.В. Алексеенко; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т теплофизики. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2015. – 236 с.

A.A. Klementiev, K.B. Minko

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

IBL MODEL MODIFICATION BASED ON RESULTS OF FILM CONDENSATION MODELING USING VOF METHOD

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук
Россия, 119991, г. Москва, ул. Косыгина, д.4

ПЕРЕМЕЩЕНИЕ КАПЕЛЬ В ЭМУЛЬСИИ С ПОМОЩЬЮ МАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ

Мир микро/наномоторов чрезвычайно разнообразен [1], а широкий исследовательский интерес к этим системам обусловлен большим многообразием прикладных задач, которые можно решать с их помощью, в таких областях, как медицина, экология, при создании сенсоров, для деградации антибиотиков и борьбы с бактериями. В настоящее время разработаны или находятся в состоянии исследований большое многообразие микро/наномоторов: Янус микро/наномоторы, спиралевидные микромоторы, трубчатые микромоторы, активные капли [2], биогибридные роботы, микромоторы на основе оксидов металлов.

Для решения многих прикладных задач, связанных с биохимией, доставкой лекарств, возникает необходимость перемещения капель в магнитном поле. Для того, чтобы капля обладала способностью двигаться в магнитном поле она должна включать в себя магнитный материал - магнитные наночастицы и/или парамагнитные молекулы. В зависимости от пространственного распределения магнитного материала в каплях: капли ферро жидкости, магнитный жидкий “мрамор” и капли в состав которых входят магнитные наночастицы. Однако не всегда возможно или целесообразно внедрять магнитный материал внутрь капли. В данной работе для перемещения капель в эмульсии в неоднородном магнитном поле была выбрана другая стратегия, когда магнитные частицы внедряются не в каплю, а распределяются в сплошной фазе эмульсии [3]. Для анализа этого способа перемещения эмульсионных капель использовалась эмульсия масло-в-воде, где в сплошной фазе эмульсии были диспергированы ферромагнитные наночастицы.

Результаты данных исследований показывают, что процесс перемещения капель в эмульсии во многом зависит от того является ли магнитные наночастицы гидрофобными или гидрофильными. Гидрофобные магнитные наночастицы адсорбируются на поверхности капель и выполняют роль моторов при их перемещении. Гидрофильные магнитные наночастицы, напротив, не адсорбируются на поверхности капель, а приводят в движение сплошную фазу эмульсии. Такие частицы выполняют роль своеобразного насоса, они перемещают сплошную фазу эмульсии, а вместе с ней и капли.

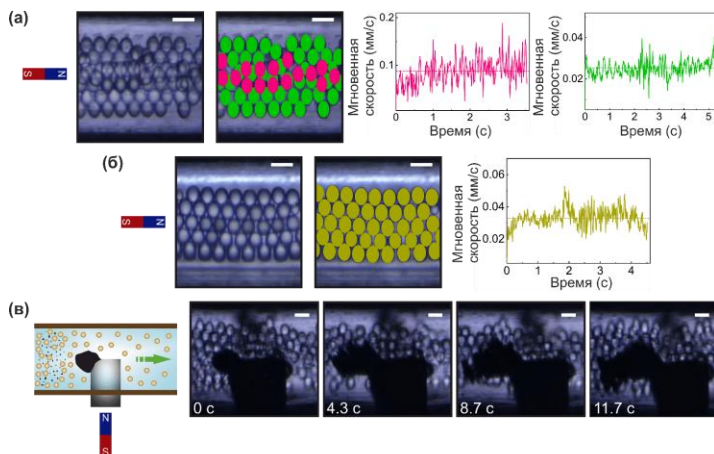


Рис. 1. Движение капель в. (а) Движение капель в эмульсии при использовании гидрофобных МНЧ. (Слева) Фотографии движущихся капель в капилляре, масштабные элементы: 100 мкм. (Справа) Зависимость мгновенной скорости капли от времени (цвет на графиках соответствует цвету капель на фотографии); (б) Движение капель в эмульсии при использовании гидрофильных МНЧ, масштабные элементы: 100 мкм.; (в) (Слева) Схема, поясняющая процесс удаления МНЧ из потока с помощью намагниченной иглы. (Справа) Последовательность снимков, демонстрирующая процесс удаления МНЧ из потока с помощью намагниченной иглы, масштабные элементы: 100 мкм.

Список литературы

1. Ning N., Zhang Y., Zhu, H., Ingham A., Huang G., Mei Y., Solovov A.A. Geometry Design, Principles and Assembly of Micromotors // *Micromachines* – 2018. – V. 9(2). – P. 75
2. Kichatov B., Korshunov A., Sudakov V., Gubernov V., Golubkov A., and Kiverin A. Self-Organization of Active Droplets into Vortex-like Structures // *Langmuir* – 2021. – V. 37. – P. 9892–9900.
3. Kichatov B., Korshunov A., Sudakov V., Petrov O., Gubernov V., Korshunova E., Kolobov A., and Kiverin A. Magnetic Nanomotors in Emulsions for Locomotion of Microdroplets // *ACS Appl. Mater. Interfaces* – 2022. – V. 14. – P. 10976–10986.

V. S. Sudakov¹

¹ N.N. Semenov Federal Research Center
for Chemical Physics Russian Academy of Sciences,
Russia 119991, Moscow, Kosygina Street, 4

MAGNETIC NANOMOTORS IN EMULSIONS FOR LOCOMOTION OF MICRODROPLETS

В.А. Шурупов^{1,2}, К.А. Бусов²

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б. Н. Ельцина,

Россия, 620062, Екатеринбург, ул. Мира, 19

² Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук,
Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 107а

ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ ВСКИПАНИЯ СТРУИ ПЕРЕГРЕТОЙ ВОДЫ ПРИ ЕЕ ИСТЕЧЕНИИ ЧЕРЕЗ КОРОТКИЕ КАНАЛЫ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ

Введение. Актуальность исследования струй метастабильной (перегретой) жидкости [1] связана с развитием теории гомогенной нуклеации, а также с широким практическим применением сред в различных технических устройствах [2,3] (струйный принтер, двигатели внутреннего сгорания, пожарная техника и т.д.).

Цель данной работы заключалась в выявлении общих закономерностей и отличий характера истечения нагретой воды через короткие каналы различной геометрической формы и в исследовании структуры потока при истечении рабочей жидкости через несколько цилиндрических каналов.

Условия проведения исследований. Исследование струй перегретой воды проводилось при её истечении из герметичной камеры высокого давления объемом $V=650 \text{ см}^3$ через короткие каналы, имеющие различные поперечные сечения: круг, квадрат, треугольник, полуцилиндр, прямоугольник и овал. Длина всех каналов равнялась $l=1 \text{ мм}$, площадь поперечного сечения – $S=0.22 \text{ мм}^2$. Термодинамические параметры (температура, давление) исследуемой среды изменялись вдоль линии фазового равновесия жидкость – пар в соответствующих пределах от $T_s=100 \text{ °C}$ до $T_s=310 \text{ °C}$ и от $p_s=0.1 \text{ МПа}$ до $p_s=10 \text{ МПа}$. Также проведено исследование динамики вскипания потока перегретой жидкости через несколько (2, 3 и 4) цилиндрических каналов диаметром $d=0.3 \text{ мм}$. Цилиндрические каналы просверливались в пластине из нержавеющей стали вдоль прямой линии.

Результаты. При истечении перегретой воды через каналы различной формы наблюдалось поэтапное изменение формы струи по мере увеличения степени перегрева жидкости. При истечении воды из канала круглого сечения форма струи сохраняла стержневой вид вплоть до температуры $T_s=190 \text{ °C}$, а в температурном диапазоне от $T_s=190 \text{ °C}$ до $T_s=210 \text{ °C}$ поток принимал конусный вид с дроблением на отдельные крупные капли. При более высоких температурах $T_s>210 \text{ °C}$, когда проявлялся в потоке эффект взрывного

вскипания, истечение жидкости происходило в радиальном направлении – полное раскрытие струи.

При истечении жидкости через каналы не круглого сечения, наблюдалось дробление струи на капли при относительно невысоких температурах $T_s < 170$ °С. В интервале температур $T_s = 170 - 210$ °С дробление струи сменялось на крупнодисперсный поток с интенсивным испарением. С достижением температуры жидкости $T_s = 210$ °С был выявлен полный развал струи, как и в случае истечения жидкости через цилиндрический канал. Для каналов с прямоугольным и овальным поперечными сечениями дискообразной формы струи обнаружено не было на всем исследованном температурном интервале.

В ходе исследований процесса вскипания перегретой воды, истекающей из нескольких цилиндрических каналов, было выявлено, что при ориентации каналов в горизонтальной плоскости наблюдалось увеличение угла раскрытия струи в вертикальной плоскости и наоборот, когда каналы были установлены в вертикальной плоскости, раскрытие струи происходило преимущественно в горизонтальной плоскости. В проведенных экспериментах не наблюдалась коническая форма струи с развернутым углом раскрытия.

Изучение капельного состава потока показало, что с увеличением степени перегрева жидкости поток становился мелкодисперсным и однородным.

Выводы. Таким образом, проведенные экспериментальные исследования позволили установить, что геометрия поперечного сечения коротких каналов оказывает значительное влияние на форму, угол раскрытия, дальность распространения, устойчивость течения и дисперсионный состав струи вскипающей воды.

Список литературы

1. Скрипов, В.П. Метастабильная жидкость. М.: Наука, 1972, 312 с.
2. Solomatin Y., Shlegel N. E., Strizhak P. A. Atomization of promising multicomponent fuel droplets by their collisions //Fuel. – 2019. – Т. 255. – С. 115751.
3. Anufriev I. S. et al. Experimental investigation of size of fuel droplets formed by steam jet impact //Fuel. – 2021. – Т. 303. – С. 121183.

V.A. Shurupov^{1,2}, K.A. Busov²

¹ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Russia, 620062, Ekaterinburg, Mira St., 19

² The Institute of Thermal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia, 620016, Ekaterinburg, Amundsen St., 107a

INVESTIGATION OF THE DYNAMICS OF BOILING-UP OF A SUPERHEATED WATER JET DISCHARGING THROUGH SHORT NOZZLES OF VARIOUS SHAPES

Д.А. Гроо¹, Д.А. Коновалов^{1,2}

¹ Воронежский государственный технический университет,
Россия, 394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

² Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Россия, 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1.

PIV-ДИАГНОСТИКА ДИСПЕРГИРОВАННОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Интенсивность теплообмена между теплонагруженной поверхностью и диспергированным теплоносителем существенно зависит от гидравлических параметров компонентов: объемных расходов воды и воздуха, подаваемых в смесительную камеру форсунок.

Изменение объёмного расхода воздуха в первую очередь влияет на скорость распространения капель диспергированного потока теплоносителя, а также на ширину факела потока, угол раскрытия и другие характеристики распыла, оказывающие заметное влияние на теплообмен с обогреваемой мишенью. Для измерения основных параметров диспергированного потока, формируемого в рассматриваемых форсунках, проводились экспериментальные исследования гидродинамики в ОИВТ РАН в зависимости от пространственных координат и гидравлических параметров компонентов с использованием двумерного PIV-метода регистрации.

PIV-метод относится к классу оптических методов измерения, с использованием которого возможно получить мгновенные поля скорости жидкости или газа в выбранном сечении потока. Лазер генерирует пару импульсов с заданной задержкой по времени, при этом камера, синхронизированная с лазером, регистрирует изображения потока капель, соответствующие этим импульсам в плоскости светового ножа. Обработка полученных изображений осуществляется стандартным кросскорреляционным алгоритмом [1], в соответствии с ним регистрируемая область разбивается на ячейки (расчетные области), внутри которых определяется корреляция изображений частиц на паре снимков. По максимуму коэффициента корреляции рассчитывается среднее значение двумерного вектора смещения в плоскости лазерного ножа. Считая задержку между снимками заданной, можно определить скорость исследуемой среды в рассматриваемой ячейке.

Съемка каждого из гидравлических режимов осуществляется с частотой 15 Гц и объемом статистики 200 мгновенных пар изображений. Чтобы обеспечить перемещение ансамбля частиц на $8 \div 15$ пикселей устанавливается временная задержка между кадрами, соответствующая $(10 \div 40)$ мкс.

На рисунке 1 приводится пример распределений скоростей (v) диспергированного потока по ширине области диагностики (x) на различных расстояниях от сопла форсунки (y).

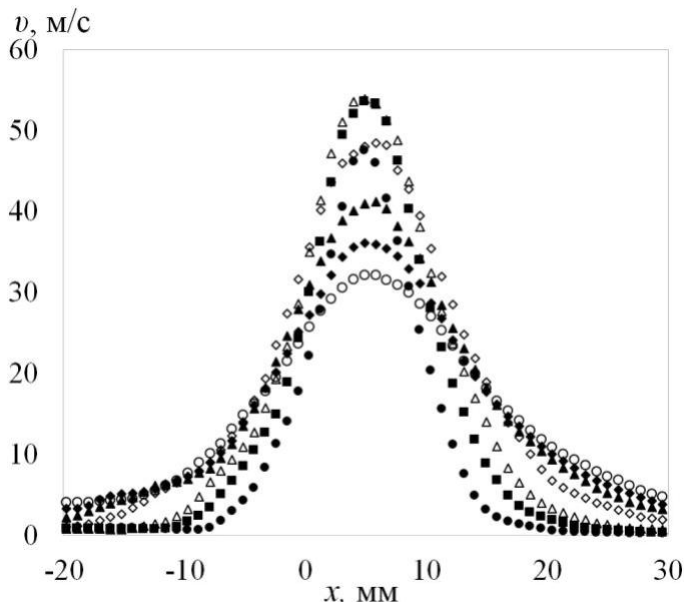


Рис. 1. Распределение скорости диспергированного потока по ширине области диагностики при $Q_{ж} = 0.50$ л/мин, $Q_v = 35$ л/мин: ● – $y = 10$ мм, ■ – $y = 20$ мм, △ – $y = 30$ мм, ◇ – $y = 60$ мм, ▲ – $y = 90$ мм, ◆ – $y = 110$ мм, ○ – $y = 130$ мм

Список литературы

1. Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скорости / М.П. Токарев, Д.М. Маркович, А.В. Бильский // Вычислительные технологии. – 2007. – Т. 12. – №. 3. – С. 109-131.
2. Scarano, F. Tomographic PIV: principles and practice / F. Scarano // Measurement Science and Technology. – 2012. – Т. 24. – №. 1. – С. 012001.
3. PIV measurements of a microchannel flow / C.D. Meinhart, S.T. Wereley, J.G. Santiago // Experiments in fluids. – 1999. – Т. 27. – №. 5. – С. 414-419.

D.A. Groo¹, D.A. Konovalov^{1,2}

¹ Voronezh State Technical University,

Russia, 394006, Voronezh, 20th Anniversary of October St., 84

² National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,
Russia, 111250, Moscow, st. Krasnokazarmennaya, 14, building 1.

PIV DIAGNOSTICS OF DISPERSED COOLANT

КОЛЕБАНИЯ МЕЖФАЗНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ КИПЕНИИ СВЕРХТЕКУЧЕГО ГЕЛИЯ В U-ОБРАЗНОМ КАНАЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОНОДИСПЕРСНОЙ ЗАСЫПКИ ДИАМЕТРОМ 70 МКМ

Сверхтекучий гелий (He-II) представляет собой уникальное состояние вещества, обладающее свойствами, которые делают его незаменимым для исследований в области низких температур. Исчезающая вязкость и высокая теплопроводность открывают возможность для изучения процессов тепло-массопереноса при работе сверхпроводящих магнитов, космических телескопов, ускорителей и т.д. Гелий-II используется для криостатирования оборудования, работающего при ультранизких температурах, в связи с чем возникает проблема поведения жидкости в стесненных условиях, таких как узкие каналы и пористые среды.

Данная статья продолжает рассмотрение экспериментальных исследований, направленных на изучение процессов тепло-массопереноса в сверхтекучем гелии-II в U-образном канале с использованием пористого наполнителя в виде шариков диаметром 70 ± 5 мкм [1]. На предыдущем этапе получено, что в зависимости от диаметра шариков пористой засыпки (240 мкм, 1 мм) меняется амплитуда и частота колебательного движения межфазной границы пар – жидкость.

Особое внимание в работе уделено влиянию пористой засыпки на поведение межфазной границы. Проведено 8 экспериментальных серий со стационарной нагрузкой от 29,2 кВт/м² до 81,2 кВт/м², диапазон давлений составил от 520 Па до 5000 Па. После обработки видеок кадров определено положение границы раздела фаз пар – жидкость, и построены соответствующие зависимости $x(t)$. В ряде случаев образуется стационарная пленка без колебаний, при этом можно наблюдать дрожание межфазной поверхности. В большинстве случаев пленка образуется не сразу, ее появление зависит от начального давления среды и величины подаваемой нагрузки. В ходе колебаний межфазная поверхность сохраняет плоскую форму без видимых искажений в том числе около стенки трубки, скорость движения порядка 1 мм/с.

На основании зависимостей $x(t)$ определены характерные значения амплитуд и частот колебаний при разных температурах жидкости. Для каждой серии построены амплитудно-частотные характеристики колебаний межфазной границы пар – жидкость при ее движении к нагревателю и обратно. В

ходе экспериментальной серии с течением времени увеличивается давление пара в криостате (над свободной поверхностью сверхтекучего гелия), при этом амплитуда колебаний монотонно увеличивается, а частота – уменьшается. Показано, что по сравнению с более крупной засыпкой (240 мкм, 1 мм) амплитуда колебаний существенно уменьшается, а частота сохраняет значения в пределах 2-3 Гц.

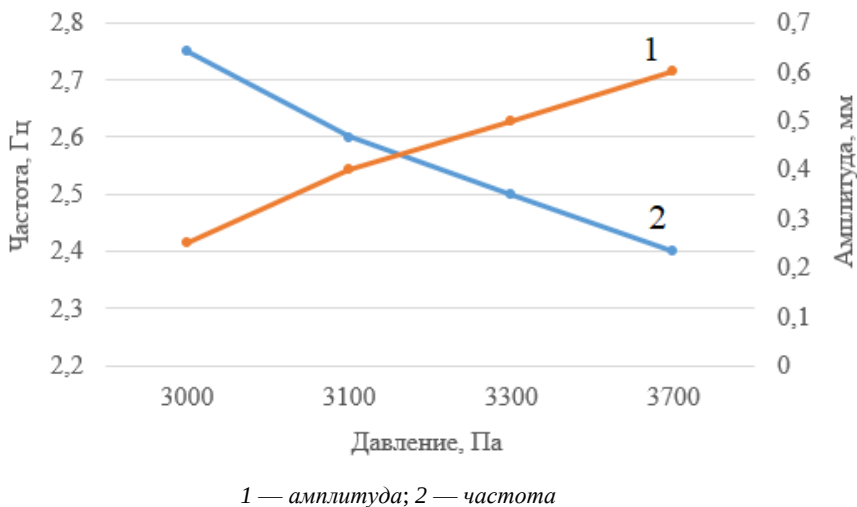


Рис. 1. Зависимость амплитуды (1) и частоты (2) колебаний от давления в серии №8

Список литературы

1. Евко Е.А., Пузина Ю.Ю. Эффект от монодисперсной засыпки при колебаниях сверхтекучего гелия в U-образном канале. // Всероссийская конференция молодых ученых-механиков YSM-2024. Тезисы докладов (4 – 14 сентября 2024 г., Сочи, «Буревестник» МГУ). – М.: Издательство Московского университета, 2024. 55 с.

E.A. Evko, Yu.Yu. Puzina

National Research University "Moscow Power Engineering Institute",
Russia, 111250 Moscow Krasnokazarmennaya 14

OSCILLATIONS OF THE INTERFACIAL SURFACE DURING THE BOILING OF SUPERFLUID HELIUM IN A U-SHAPED CHANNEL USING A MONODISPERSE FILLING WITH A DIAMETER OF 70 MM

Е.В. Колесник^{1,2}, Д.К. Зайцев¹, Е.М. Смирнов¹

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

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Россия, 194021, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ VOF ПРОЦЕССОВ ПЛЕНОЧНОЙ КОНДЕНСАЦИИ НА ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛАСТИНЕ

Исследованию процессов пленочной конденсации пара на различных поверхностях посвящено большое число работ [1-7]. Сегодня все большую популярность приобретает метод VOF, позволяющий определять положение поверхности раздела фаз в сквозном расчете. В случае применения метода VOF для расчета течений с конденсацией основной проблемой является выбор, оценка эффективности и возможные модификации модели для расчета источников массы жидкой фазы вследствие фазового перехода [4].

Одной из широко используемых моделей межфазного перехода является модель Lee [1], реализованная, в частности, в коммерческом пакете ANSYS Fluent. Однако многие исследователи указывают на недостатки этой модели, связанные, в первую очередь, с наличием эмпирических констант, значения которых зависят от конкретной постановки, и могут меняться на много порядков [3]. Многие работы направлены на модификацию этой модели [5-7], например, в [7] предложен алгоритм автоматического подбора констант.

В настоящей работе представляются результаты начального этапа исследований авторов по применению метода VOF к задачам пленочной конденсации насыщенного пара. На задаче о конденсации на вертикальной пластине исследуются методические аспекты численного моделирования методом VOF с использованием модели конденсации Lee [1]. Схема течения приведена на рис.1. В качестве рабочего вещества рассматривается этилен. Поверхность пластины поддерживается при постоянной температуре T_w , ниже температуры насыщения T_s . Для выбранных параметров число Рейнольдса, построенное по толщине пленки, $Re_\delta < 10$. С применением пакета ANSYS Fluent 2022R1, расчеты (на сетках различного разрешения) проведены при варьировании значения константы r в модели Lee на несколько порядков.

На рис. 1 приведены расчетные распределение коэффициента теплоотдачи вдоль пластины в сопоставлении с теорией Нуссельта. При задании константы $r=1000$ 1/с расчетный коэффициент теплоотдачи чрезвычайно занижен, толщина пленки также существенно меньше теоретической, даже при расчетах на весьма подробных сетках. Постепенное увеличение константы r

приближает расчетные значения к теоретическим, однако в итоге приводит к проблемам со сходимостью итерационного процесса.

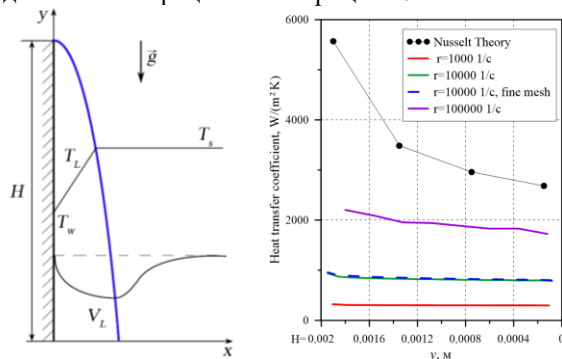


Рис. 1. Схема пленочной конденсации на вертикальной пластине (слева) и распределение коэффициента теплоотдачи вдоль пластины (справа)

Список литературы

1. Lee W.H. A pressure iteration scheme for two-phase flow modeling // Multiphase transport: fundamentals, reactor safety, applications / Ed. by T.N. Veziroglu. Washington, DC: Hemisphere Publishing, 1980. P. 407–432.
2. Liu Z., Sundén B., Yuan J. VOF modeling and analysis of filmwise condensation between vertical parallel plates // Heat Transfer Research. – 2012. – Vol. 43. – № 1. – P. 47–68.
3. Lee H., Kharangate C. R., Mascarenhas N., Park I., Mudawar I. Experimental and computational investigation of vertical downflow condensation // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2015. – Vol. 85. – P. 865–879.
4. Kharangate C.R., Mudawar I. Review of computational studies on boiling and condensation // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2017. – Vol. 108. – P. 1164–1196.
5. Vilar D., Martín E., Sieres J. CFD Simulation of Laminar Film Condensation on a Vertical Surface // International Refrigeration and Air Conditioning Conference. – 2021.
6. Guichet V., Delpech B., Jouhara H. Experimental investigation, CFD and theoretical modeling of two-phase heat transfer in a three-leg multi-channel heat pipe // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2023. – Vol. 203. – P. 123813.
7. Минко К.Б., Артемов В.И., Клементьев А.А. Моделирование методом VOF процессов конденсации неподвижного и движущегося насыщенного пара на поверхности горизонтальной трубы // Теплоэнергетика. – 2023. – № 3. – P. 20–39.

E.V. Kolesnik^{1,2}, D. K. Zaitsev¹, E.M. Smirnov¹

¹ Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University,
Russia, 195251, Saint Petersburg, Politekhnicheskaya st., 29

² The Ioffe Physical-Technical Institute of the RAS,
Russia, 194021, Saint Petersburg, Politekhnicheskaya st., 26

VOF MODELING OF FILMWISE CONDENSATION PROCESSES ON A VERTICAL PLATE

Р.В. Федоров, И.И. Шепелев, М.А. Малешина

Ульяновский государственный технический университет,
Россия, 432027, Ульяновск, Северный Венец, 32

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ И УСЛОВИЙ НАПРАВЛЕННОГО ФОРМИРОВАНИЯ КЛАСТЕРОВ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ РАБОЧЕГО ТЕЛА ПОСРЕДСТВОМ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Современная энергетическая отрасль сталкивается с серьезными экологическими вызовами. Ужесточение требований к снижению вредных выбросов стимулирует поиск новых технологий для оптимизации процессов горения. Особое внимание уделяется изучению сложных физико-химических процессов, происходящих в потоках рабочего тела. К ним относятся гидрогазодинамика, тепломассоперенос, формирование кластеров дисперсной фазы (например, пара или микрокапель жидкости) и их влияние на эффективность работы оборудования. Эти процессы протекают под воздействием множества факторов: интенсивных градиентов давления, тепловой нестационарности, фазовых переходов и др.

Однако натурные испытания таких технологий часто оказываются слишком затратными или даже невозможными из-за технических ограничений. В таких случаях на помощь приходит математическое моделирование, которое позволяет исследовать как хорошо изученные, так и малоизвестные процессы. Вычислительный эксперимент дает возможность анализировать каждый фактор в отдельности, не изменяя весь объект целиком, а также тестировать различные варианты без необходимости дорогостоящей физической модели.

В рамках нашего исследования была разработана цифровая модель горелочного устройства энергетического котла для анализа влияния впрыска пара на процессы горения. Для проведения исследований был разработан специализированный программный комплекс, автоматизирующий численные эксперименты с использованием цифровой модели горелочного устройства в CFD-системе. Он включает модули для взаимодействия с CAD и CFD-системами, а также предоставляет удобный графический интерфейс для настройки параметров расчетов [1]. Расчет двухфазных потоков включает моделирование переноса массы, импульса и тепла для каждой фазы с учетом их взаимодействий. Разработанная модель двухфазного пограничного слоя, учитывает внутренние источники тепла и импульса, турбулентный перенос, а также влияние градиента давления и частиц на скорость и температуру потока.

Для цифровой модели была разработана расчетная сетка с адаптацией плотности в зависимости от зон камеры сгорания. В областях интенсивного смешения топливовоздушной смеси и закрутки потоков применяется максимально плотная сетка (3% от базового размера), что позволяет точно фиксировать градиенты скорости, температуры и концентраций. Вдоль оси горелки, где процессы менее активны, используется менее плотная сетка (10% от базового размера). В остальной части камеры сгорания применяется базовый размер сетки для оптимизации вычислительных ресурсов.

В качестве исходных данных для расчетов использовалась карта режимов действующего энергетического котла. Это позволило сделать модель максимально реалистичной и обеспечить возможность сравнения результатов с натурными данными. На текущем этапе исследования подтверждена техническая возможность использования впрыска пара для оптимизации процессов горения и снижения вредных выбросов. Проведенные расчеты показали, что впрыск пара существенно снижает температуру в зоне горения. Это приводит к уменьшению образования оксидов азота (NO_x). Проведены вычислительные эксперименты по оптимизации параметров впрыска пара, таких как угол впрыска, скорость подачи и температура пара. Установлено, что этот метод действительно эффективен и может стать одним из перспективных направлений развития экологически чистых технологий в энергетике. Кроме того, важно отметить, что использование впрыска пара имеет не только экологическую, но и экономическую значимость. Снижение выбросов вредных веществ позволяет минимизировать затраты на штрафы и экологические платежи.

Исследования выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-29-00618, <https://rscf.nt/project/24-29-00618/>.

Список литературы

1. Fedorov, R.V.; Shepelev, I.I.; Malyoshina, M.A.; Generalov, D.A.; Sherkunov, V.V.; Sapunov, V.V. Software Package for Optimization of Burner Devices on Dispersed Working Fluids. *Energies* 2025. 18. 806. <https://doi.org/10.3390/en18040806>

R.V. Fedorov, I.I. Shepelev, M.A. Maleshina

Ulyanovsk State Technical University,
Russia, 432027, Ulyanovsk, Severny Venets, 32

INVESTIGATION OF THE POSSIBILITIES AND CONDITIONS FOR THE DIRECTED FORMATION OF DISPERSED PHASE CLUSTERS OF THE WORKING FLUID THROUGH INFLUENCES

И.А. Евдокименко¹, К.А. Филиппский¹, П.Д. Лобанов¹, А.В. Чинак¹

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

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ОРГАНИЗАЦИИ ОТРЫВНОГО ПУЗЫРЬКОВОГО ПОТОКА НА ТЕПЛООБМЕН В ПРЯМОУГОЛЬНОМ КАНАЛЕ ПРИ МАЛОМ ГАЗОСОДЕРЖАНИИ

Двухфазные течения широко применяются во многих отраслях промышленности, таких как химическая технология, биотехнологии, нефтехимия, энергетика и др. Зачастую в различных элементах установок для оптимизации процессов теплообмена используют завихрители, которые в некоторых случаях могут приводить к отрыву течения [1]. Формирование отрывных зон приводит к изменению структуры течения, что напрямую связано с механизмами переноса тепла. На данный момент в литературе практически не представлено данных по совместному влиянию газовой фазы и отрыва потока на теплообменные характеристики [2]. Влияние способа организации отрыва в пузырьковом течении также практически не рассматривалось. Целью данной работы является экспериментальное исследование теплообмена на стенке в плоском канале с обратным уступом и одиночной прямоугольной преградой при малом газосодержании.

Экспериментальный стенд представляет собой оргстеклянный канал прямоугольного сечения с размерами 200x16x1000 мм. Для создания внезапного расширения в канале закреплялась пластина высотой $H=8$ мм. В качестве одиночной преграды использовался параллелепипед прямоугольного сечения с размерами 200x8x20 мм, который фиксируется в канале при помощи магнитов. Рабочая жидкость (дистиллированная вода) подается в канал при помощи центробежного насоса. Ввод газа осуществляется через 9 капилляров с диаметром 0,3 мм, размещенных по всей ширине канала. Эксперименты проводились в диапазоне числа Рейнольдса, рассчитанному по высоте ступени ($Re_H = uH/\nu$) от 0 до 12500. Расходное газосодержание β варьировалось от 0 до 5%.

Для измерения теплообмена на стенке был изготовлен рабочий участок, который представляет собой фольгу из нержавеющей стали с размерами 70x145 мм и толщиной 0,2 мм, нагрев которой осуществлялся путем пропускания через неё электрического тока от источника с постоянной плотностью теплового потока 10000 Вт/м². Данные о распределении температуры внешней стенки фольги фиксировались при помощи тепловизора марки FLIR.

Было показано, что для двух способов организации потока характерно наличие зоны малоинтенсивного теплообмена в зоне рециркуляции, что наблюдается, как для одно-, так и для двухфазных потоков. По мере удаления от рециркуляционной зоны, интенсивность теплообмена возрастает и достигает максимума. Ниже по потоку наблюдается стабилизация интенсивности теплообмена. Введение пузырей в канал с одиночной преградой приводит к интенсификации теплообмена в области присоединения потока, что проявляется ростом максимального значения числа Нуссельта Nu по мере увеличения газосодержания. В случае обратного уступа, изменения максимального значения числа Nu не наблюдается, а вся интенсификация лежит в зоне релаксации потока.

Показано, что введение пузырей в отрывной поток приводит к интенсификации теплообмена на величину до 400% по сравнению с однофазным течением в прямоугольном канале без отрыва потока. Выяснено, что способ организации отрыва потока оказывает значительное влияние на распределение числа Nu в канале. Таким образом, введение преграды приводит к интенсификации теплообмена, как в зоне присоединения потоков, так и в зоне релаксации, в то время как, введение обратного уступа улучшает теплообмен лишь в зоне релаксации. Такой эффект объясняется смещением газовых пузырей к стенке под преградой после прохождения зоны возвратного течения.

Список литературы

1. Terekhov V.I., Yarygina N.I. and Zhdanov R.F. Heat transfer in turbulent separated flow in the presense of high free-stream turbulence // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2003. Vol. 46, No. 23. P. 4535–4551.
2. Lobanov, P. Experimental and Numerical Study of the Flow and Heat Transfer in a Bubbly Turbulent Flow in a Pipe with Sudden Expansion / P. Lobanov, M. Pakhomov, V. Terekhov // *Energies*. – 2019. – Vol. 12. – № 14. – P. 2735.

I.A. Evdokimenko¹, K. A. Filippskii¹, P.D. Lobanov¹, A.V. Chinak¹

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Russia, 630090, Novosibirsk, 1 Lavrentiev Ave.

EFFECT OF THE METHOD OF FLOW SEPARATION IN BUBBLE FLOW ON HEAT TRANSFER IN A RECTANGULAR CHANNEL AT LOW VOID FRACTION

С.В. Какаулин¹, И.К. Кабардин¹, М. Р. Гордиенко¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.

Россия, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТРАДИЦИОННЫХ МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ ВЕТРОГЕНЕРАТОРОВ ОТ ОБЛЕДЕНЕНИЯ

Обледенение является одной из ключевых проблем, с которыми сталкиваются различные отрасли, включая авиацию, энергетический сектор и транспортную инфраструктуру. Ветровая энергетика особенно уязвима перед этой угрозой: образование льда на лопастях ветрогенераторов снижает их эффективность, увеличивает нагрузку на конструкцию и может привести к выходу из строя оборудования. Это не только снижает экономическую целесообразность эксплуатации ветропарков, но и повышает риски для окружающей среды и безопасности.

Разработка и совершенствование противообледенительных методов являются необходимыми мерами для обеспечения стабильной работы ветрогенераторов в холодных климатических зонах. Современные технологии защиты от обледенения включают как активные (нагревательные элементы, вибрационные методы и др.), так и пассивные методы (специальные покрытия, конструктивные решения и др.). Однако их энергоэффективность со стороны комбинированного применения остается открытой темой для исследования.

В данном исследовании рассматриваются традиционные противообледенительные технологии с точки зрения диагностики обледенения и также энергоэффективности комбинированного применения. Анализ существующих решений позволит выявить оптимальные стратегии борьбы с обледенением и снизить эксплуатационные затраты в условиях низких температур.

Целью исследования является разработка энергоэффективного метода по борьбе с обледенением на лопастях ветрогенераторов на основе совместного применения гидрофобных покрытий и традиционных методов.

В ходе работы были исследованы три режима образования льда на тестируемой поверхности: наледь, иней и изморозь. Экспериментальная площадка размером 30×70 мм располагалась на лопасти ветрогенератора, а оценка эффективности противообледенительных методов проводилась по остаточному количеству льда после воздействия и энергозатратам на его удаление. Вибрационный и ультразвуковой методы показали свою эффективность при различных толщинах льда. В ходе тестов определялись оптимальные параметры

– время нагрева, амплитуда вибрации и мощность ультразвука. Вибрационный метод включал воздействие электромагнита и наддув воздуха через аэродинамически прозрачную поверхность. Эксперименты показали, что сочетание вибрации и наддува создает синергетический эффект: электромагнит воздействует локально, а воздушный слой снижает сцепление льда с покрытием, способствуя его удалению.

Кроме того, проведены исследования комбинированных противообледенительных методов, включающих супергидрофобные покрытия, тепловой, ультразвуковой и вибрационный способы защиты. Установлено, что ультразвуковые излучатели не только создают поверхностные вибрации, но и нагревают материал, что улучшает эффективность борьбы с наледью. Однако их действие ограничено зоной около 20 % от диаметра излучателя. Тепловой нагрев эффективно растапливал лед, но без дополнительного механического воздействия лед не удалялся с поверхности. Оптимальной оказалась комбинация нагрева и вибрации: за счет нагрева снижалось сцепления льда с поверхностью, а затем лед стряхивался с поверхности. Экспериментальные исследования подтвердили, что использование комбинированных методов значительно повышает энергоэффективность борьбы с обледенением по сравнению с одиночными способами воздействия, а применение супергидрофобных покрытий дополнительно снижает адгезию льда, способствуя его более быстрому удалению.

Список литературы

1. Elistratov, V., Konishchev, M., Denisov, R.. Study of the Intelligent Control and Modes of the Arctic-Adopted Wind–Diesel Hybrid System. *Energies*, 2021. 14. 4188.
2. Л.Б. Бойнович, В.М. Бузник, П.Н. Гракович, В.И. Грязнов, А.С. Пашинин, Г.Ю. Юрков Создание и модифицирование супергидрофобных материалов на основе волокнистого политетрафторэтилена// *Химическая технология*, 2015. - Т.462 № 4. - С. 431-334.

S.V. Kakaulin¹, I. K. Kabardin¹, M.R. Gordienko¹

¹S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Russia, 630090, Novosibirsk, Ak. Lavrentieva Ave. 1.

INVESTIGATION OF ENERGY EFFICIENCY OF TRADITIONAL METHODS OF PROTECTING WIND TURBINES FROM ICING

Ю.П. Ивочкин¹, С.М. Юдин^{1,2}¹Объединенный институт высоких температур РАН
125412, Москва, Ижорская 13 стр.2²НИУ Московский Энергетический Институт,
111250, Москва, Красноказарменная, 14, стр.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОТЕКАНИЯ МАЛОМАСШТАБНЫХ ПАРОВЫХ ВЗРЫВОВ ЛЕГКОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ

Взаимодействие расплавленного металла с охлаждающей жидкостью - водой, может приводить к его взрывной фрагментации, сопровождающейся генерацией высоких импульсов давления. На сегодняшний день, существует около двух десятков гипотез, описывающих подобное взаимодействие, которые, как правило, основываются на визуальных наблюдениях. Проведенная нами серия экспериментов на жидком олове позволила выявить некоторые особенности процесса тонкой фрагментации, не отмечавшиеся в предыдущих исследованиях. Эти наблюдения стали основой для формулировки гипотезы о возможном сценарии взрывного диспергирования жидкой капли.

Обработка видеосъемки последних испытаний показала, что на поверхности расплавленной капли может возникать локальная дестабилизация (рис.1а) паровой пленки, нарастающая в течении $t \sim 1$ мс (рис.1.б). После чего подобное возмущение приводит к разрушению паровой прослойки по всей поверхности металла и последующему взрыву (рис.1.в).

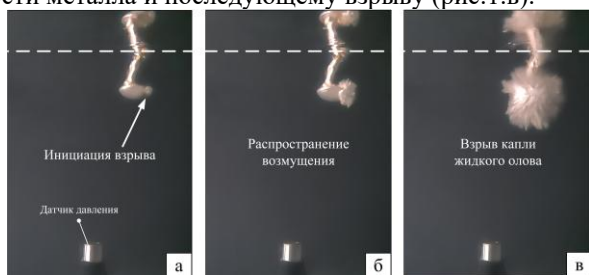


Рис. 1. Кадры процесса взрывной фрагментации Sn, $T = 700^{\circ}\text{C}$; пунктирная линия – уровень свободной поверхности; (а) – локальная дестабилизация пленки, (б) – рост возмущения (в) – последующий паровой взрыв всей капли;

Одновременно с видеосъемкой производились измерения генерируемых в процессе взрывной фрагментации импульсов давления датчиком Kistler 701A. Полученные зависимости $P(t)$ демонстрируют наличие низкочастот-

ных пиков непосредственно перед моментом взрыва (рис. 2а). Авторы интерпретируют наблюдаемые пульсации как результат стремительного (взрывного) роста парового объема на поверхности капли. Детальный анализ этих пульсаций выявил экспоненциальный характер нарастания амплитуды с каждым последующим пиком (рис.2б).

Полученные результаты позволяют выдвинуть вероятный сценарий протекания процесса маломасштабного парового взрыва, в основе которого лежит возможность прямого контакта горячей поверхности и холодной жидкости ввиду процесса локального захлаживания. Возникающий при этом паровой объем генерирует импульсы давления, приводящие к разрушению всей паровой пленки на поверхности и взрывному разрушению всей капли.

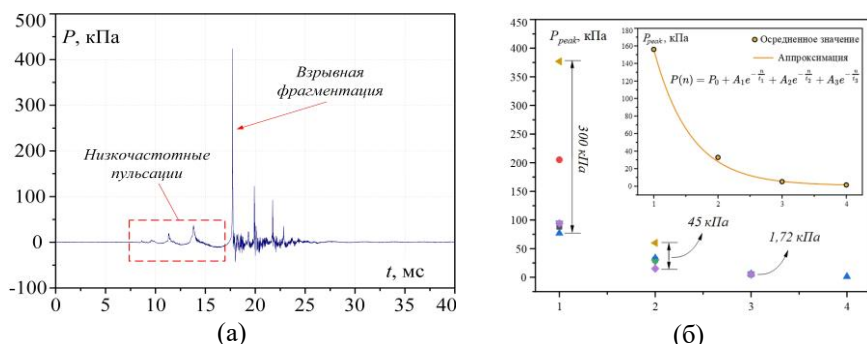


Рис.2 График зависимости (а) – $P(t)$ для капли олова с низкочастотными пульсациями перед взрывом, (б) – амплитудного значения низкочастотных пиков от номера пика – отсчет пиков идет наибольшего к меньшему;

Экспериментальные зависимости $P(t)$ позволили провести пересчет амплитудных значений давления непосредственно вблизи места взрыва. Полученные оценки в зависимости от условий значения лежат в пределах 10 кПа до значений ~ 1000 кПа.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ РФ № 075-00269-25-00.

Y. P. Ivochkin¹ S.M. Yudin^{1,2},

¹ Joint Institute of High Temperature,
Russia, 125412 Moscow, Izhorskaya 13, Bd.2

² NRU Moscow Power Engineering Institute
111250 Russia, Moscow, Krasnokazarmennaya 14

STUDY OF THE CHARACTERISTICS AND MECHANISMS OF SMALL-SCALE STEAM EXPLOSIONS IN LOW-MELTING METALS

СЕКЦИЯ 3

Тепло- и массообмен в условиях
химических превращений, горение

А.В. Тарасов¹, С.В. Веретенников¹, И.А. Благушин¹

¹ Рыбинский государственный авиационный технический
университет имени П. А. Соловьева,
Россия, 152934, Рыбинск, ул. Пушкина, 53

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ГОРЕНИЯ В ПРОТИВОТОЧНОЙ ВИХРЕВОЙ ТРУБЕ

Основной задачей при разработке высокоэффективных горелочных устройств для камер сгорания энергетических установок и газотурбинных двигателей, а также для систем сжигания топлива в технологических процессах с использованием современных энергосберегающих технологий, является достижение устойчивого фронта пламени и недопуск перегрева стенок камеры сгорания. Поиск новых путей для оптимизации процесса горения требует внедрения инновационных научно-технических решений, основанных на оригинальных физических явлениях и соответствующих устройствах. Одним из таких явлений является эффект Ранка-Хилша, а также термогазодинамическая структура закрученного потока, связанная с ним. Существует особый класс закрученных потоков, при движении которых в ограниченном пространстве осесимметричных каналов формируется аэродинамический противоток, известный как реверс течения. Эти потоки называют противоточными.

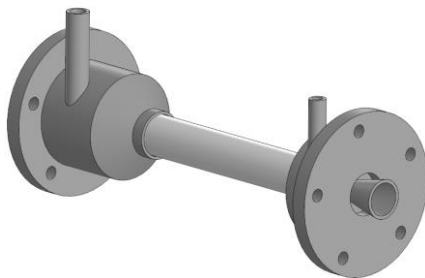


Рис.1. Противоточное вихревое горелочное устройство

Эксперимент проводился для ряда режимов, отличающихся тепловой мощностью и расходами воздуха, где в качестве топлива использовался баллонный газ пропан, а в качестве окислителя атмосферный воздух: богатый при $\alpha = 0.8$, стехиометрический при $\alpha = 1$ и бедный при $\alpha = 2.5$. Каждый из них был в свою очередь посчитан три раза при разном расходе воздуха, составляющем 2.5 г/с, 3.5 г/с и 4.5 г/с.

На каждом из режимов потоков посчитаны числа Рейнольдса, равные 82139.6, 115000.76 и 147856.6 соответственно.

Для проведения эксперимента разработано горелочное устройство, изображенное на рисунке 1.

Результаты показали, что число Рейнольдса влияет на процесс горения в камере сгорания. Чем меньше число Рейнольдса, тем менее стабильным и устойчивым является процесс горения. Видимый фронт пламени имеет большую стабилизацию при бедном режиме горения

При богатом и стехиометрическом режимах горения поле максимальных температур соприкасается со стенками внутри камеры сгорания, что означает риск нагревания стенок камеры сгорания. При бедном режиме горения максимальное поле температур находится на центральной оси камеры сгорания, а видимый фронт пламени становится более устойчивым и стабильным.

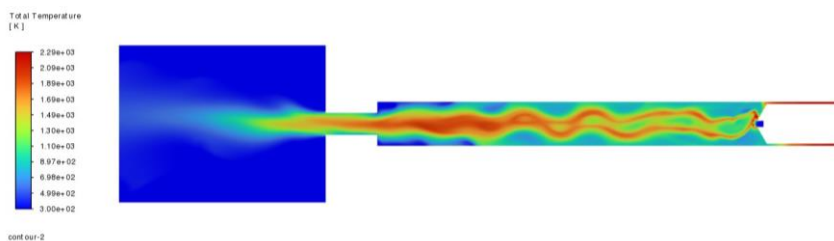


Рис.2. Поле температур при бедном режиме горения

Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение фундаментальных научных исследований (шифр научной темы FSSG-2023-0002.

Список литературы

1. Veretennikov S.V., Piralishvili Sh.A., Evdokimov O.A., Guryanov A.I. Heat transfer simulation of unsteady swirling flow in a vortex tube // Journal of Physics: Conference Series, 2018 - Vol. 980 - pp. 1-6.
2. Ghafourian A, Saidi M. H., Jahangirian S, Abarham M. Effect of Vortex Flow on Heat Transfer to Combustion Chamber Wall // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power DOI: 10.1115/1.2431386 April 2007

A.V. Tarasov ¹, S. V. Veretennikov ¹, I.A. Blagushin ¹

¹ P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University,
Russia 152934, Rybinsk, Pushkin St., 53

INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF COMBUSTION IN A COUNTERCURRENT VORTEX TUBE

А.А. Асикритов¹, А.И. Гурьянов¹

¹ Рыбинский государственный авиационный технический
университет имени П. А. Соловьева,
Россия, 152934, Рыбинск, ул. Пушкина, 53

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИКИ ТЕЧЕНИЯ ВОЗДУХА И ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБУЛЕНТНОСТИ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ МГТД

В простом термодинамическом цикле газотурбинных двигателей к потоку рабочего тела подводится тепло. В ГТД этот процесс осуществляется в камере сгорания (КС) [1]. Тепло выделяемое за счет сгорания углеводородного топлива, т.е. преобразования химической энергии топлива в тепловую, при этом температура рабочего тела возрастает от значения перед камерой сгорания до значения после камеры сгорания.

Реальный процесс в КС отличается от идеального наличием потерь давления. Потери давления в камере сгорания складываются из гидравлических потерь (потерь на трение) и потерь от подвода тепла к потоку рабочего тела [1]. Гидравлические потери, в свою очередь, можно разделить на составляющие потери: *в диффузоре; в кольцевых каналах; на втекание воздуха в отверстия жаровой трубы; на смешение струй и вихреобразование.*

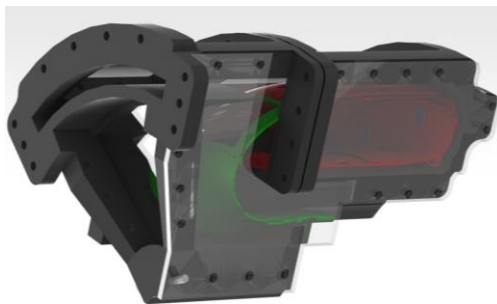


Рис.1. Экспериментальная модель сектора камеры сгорания.

В работе приведены исследования, направленные на визуализацию основных зон турбулизации потока воздуха, скорости течения и вихреобразования. Тем самым исследование дает понимание о протекании испарения взвеси жидкого топлива, распыленного из форсунок и интенсивности перемешивания топливовоздушной смеси.

Объектом исследования является сектор камеры сгорания МГТД (в данном случае представленный сектор имеет 1/6 окружности), представленный на рисунке 1, в качестве рабочего тела выступает засеянный поток воздуха, нагнетаемый воздуходувкой. Засев потока производится с

помощью дым-генератора. Использованный поток засеянного воздуха выбрасывается в атмосферу.

В ходе проведения эксперимента были подобраны 2 режима соответствующие по расходу воздуха режиму запуска в первом случае и режиму малого газа во втором случае. Наиболее яркая картина разделения камеры сгорания на характерные зоны наблюдается в случае исследования режима малого газа и соответственно расхода равного 0.9 кг/с. Изменяя режимы работы можно менять интенсивность вихреобразования, а также геометрическое расположение основных вихрей, таким образом достигая режима работы наилучшей стабилизации пламени и получения оптимальной эпюры давления в выходном сечении.

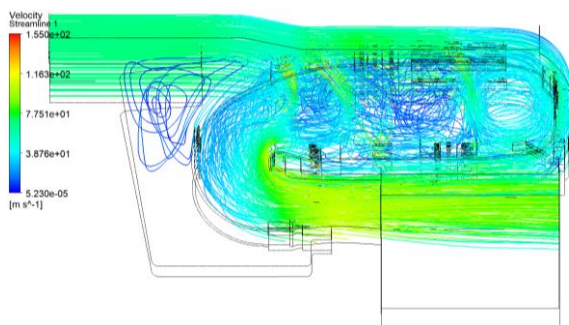


Рис.2. Линии тока скорости внутри камеры сгорания

Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение фундаментальных научных исследований (шифр научной темы FSSG-2023-0002.

Список литературы

1. Verkholtantsev A. A. Zlobin V. G. Gas turbine installations Part 2: Design of GTU and their elements. Textbook // Higher School of Technology and Energy. - 2021. – 54
2. Raffel M., Willert C.E., Kompenhans J. Particle Imaging Velocimetry. – Berlin, 2001.

A.A. Asikritov¹, A.I. Guryanov¹

¹ P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University,
Russia 152934, Rybinsk, Pushkin St., 53

INVESTIGATION OF THE GAS DYNAMICS OF AIR FLOW AND TURBULENCE CHARACTERISTICS IN THE COMBUSTION CHAMBER OF MGTE

Д.С. Трезуб^{1,2}, И.А. Мельников²

¹Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»,

Россия, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, 14

²Научно-исследовательский центр «Курчатовский институт»,

Россия, 123182 Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

ОБ ЭФФЕКТЕ ПРОЦЕССА КОРРОЗИИ ДЛЯ АНАЛИЗА УДЕРЖАНИЯ РАСПЛАВА ВНУТРИ КОРПУСА

Внутрикорпусное удержание рассматривается как один из возможных методов управления тяжелой аварией с плавлением и разрушением активной зоны и формированием ванны расплава. Критерием эффективности удержания считается недостижение кризиса теплообмена на поверхности корпуса реактора. Кроме того, еще одним важным параметром является остаточная толщина корпуса реакторной установки. Она может уменьшаться как за счет плавления, так и за счет коррозионного взаимодействия расплава со сталью. В рамках программы МНТЦ METCOR были проведены эксперименты по изучению коррозионного взаимодействия легкоплавкого и тугоплавкого сверхстехиометрического, а также недоокисленного кориума с корпусом реакторной установки [1]. Было получено, что в первом случае коррозия происходит по механизму окисления, и разработана модель описания данного процесса. Для случая взаимодействия с недоокисленным расплавом, показано, что коррозия определяется эвтектическим растворением стали, и предложена эмпирическая модель. Результаты экспериментов показывают, что необходим учет данного эффекта в тяжелоаварийных расчетах, для более адекватной оценки возможности применения удержания расплава внутри корпуса как метода управления тяжелой аварией. На сегодняшний день существующие тяжелоаварийные коды не включают в себя учет эффектов коррозионного взаимодействия.

В данной работе рассматривается разработка методики расчета коррозионного взаимодействия тугоплавкого расплава с корпусом реакторной установки, на основе модели из работы [1]. Кроме того, проводится оценка вклада теплового эффекта реакции окисления на процесс коррозионного взаимодействия. Также в работе приводится разработка модели для описания эвтектического растворения стали при взаимодействии с недоокисленным кориумом на основе уравнения А.Н. Щукарева и проводится сравнение с моделью работы [1].

В результате было установлено, что предложенная в данной работе модель показывает лучшее совпадение с результатами экспериментов, по срав-

нению с моделью работы [1], а также более физически обоснована. В частности, в работе получено, что влияние теплового эффекта реакции окисления на коррозионное взаимодействие минимально. Кроме того, проведены расчеты для оценки утонения корпуса реакторной установки. Показано, что в зависимости от протекания аварийного процесса возможно утонения корпуса реакторной установки до 10 мм.

Список литературы

1. Bechta, S.V., Granovsky, V.S., Khabensky et al. VVER steel corrosion during in-vessel retention of corium melt. European Review Meeting on Severe Accident Research (ERMSAR Meeting), 23–25 September, Nessebar, Bulgaria. Bentaïb, 2008b

D.S.Tregub^{1,2}, I.A. Melnikov²

¹ National Research University "Moscow Power Engineering Institute",
14, Krasnokazarmennaya St, 111250 Moscow, Russia

² National Research Center "Kurchatov Institute",
1, Akademika Kurchatova Sq, 123182 Moscow, Russia

ABOUT THE EFFECT OF CORROSION PROCESS FOR THE ANALYSIS OF THE MELT RETENTION INSIDE THE VESSEL

К. Ю. Арефьев¹, О. В. Гуськов¹, Д. Л. Мамышев¹

¹ ФАУ «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова»,
Россия, 111116, Москва, ул. Авиамоторная, 2

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАЗНЫХ СПОСОБОВ ПОДАЧИ ВОДОРОДА НА ПАРАМЕТРЫ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО РЕАГИРУЮЩЕГО ПОТОКА В МОДЕЛЬНОМ ТРАКТЕ

Организация высокоэффективного процесса смешения и горения горючего может осуществляться разными способами. В зависимости от способа подачи топлива можно выделить спутную, пристеночную подачу и подачу с помощью разнообразных пилонов. Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки. Данная работа посвящена сравнению характеристик потока при разных способах подачи водорода.

Исследование проводится на примере модельного цилиндрического канала с постоянной и расширяющейся площадью поперечного сечения. Высокоскоростной поток окислителя создается за счёт профилированного сопла. Подача водорода осуществляется с помощью соосно-спутной, пристеночной форсунки и с помощью специального пилона.

Расчеты проводятся на многоблочной сетке, содержащей около 200 000 / 800 000 / 1 500 000 ячеек в зависимости от рассматриваемого способа подачи. На входе в расчетную область задаются полные параметры потока (давление $p_0 \approx 5$ МПа, полная температура T_0 , превышающая $\sim$ в 2.5 раза температуру самовоспламенения) и состав квазिवоздуха. На форсунках задается расход в зависимости от давления квазिवоздуха при коэффициенте избытка окислителя ≈ 1 и полная температура $T_0 = 300$ К. На выходе – статическое давление. На стенках – условия прилипания и заданной температуры. В качестве модели турбулентности используется модель γ -Re Θ [1], в качестве химико-кинетического механизма модель [2] и для учёта взаимодействия турбулентности и химической кинетики используется квазиламинарная аппроксимация (QLA), (LFR). Сходимость по сетке проводится на основе коэффициента полноты сгорания топлива и распределения давления на стенке вдоль канала.

Валидация расчетных моделей проводится на основе известных экспериментов [3-6].

В результате моделирования получены расчетные поля температур, давления, чисел Маха и компонент при горении водорода в высокоскоростном потоке воздуха в модельном канале. Показаны основные отличия в структурах течения, в частности, объем участвующего в окисления горючего. Определены коэффициенты полноты сгорания топлива для разных способов подачи

водорода. Характерное распределение давления для одного из способов подачи водорода при разных режимах представлено на рис. 1.

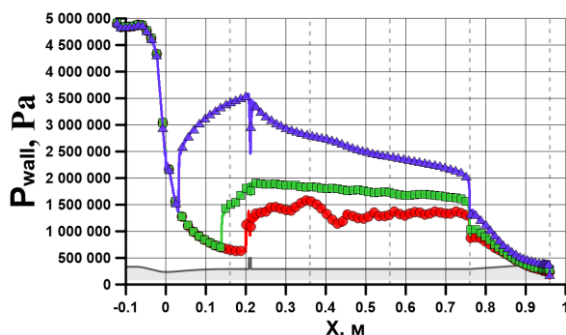


Рис. 1. Распределения давления вдоль канала для одного из способов подачи водорода при разных режимах

Список литературы

1. Langtry R.B., Menter F.R. Correlation-Based Transition Modeling for Unstructured Parallelized Computational Fluid Dynamics Codes // AIAA Journal, Vol. 47, No. 12, 2009. pp. 2894-2906.
2. Hong Z., Davidson D. F., Hanson R. K. An improved H₂/O₂ mechanism based on recent shock tube/laser absorption measurements // Combustion and Flame, Vol. 158, 2011. pp. 633-644.
3. Kukshinov N.V., Batura S.N. Numerical simulation of hydrogen combustion in oxidizer supersonic flow in flowpaths of various configurations // J.Phys.:Conf.Ser, No. 1359 012064, 2019.
4. Kukshinov N.V., Mamyshev D.L. Numerical simulation of the shock-wave structure of a reacting hydrogen-air mixture in a model channel // J.Phys.:Conf.Ser, No. 2057 012067, 2021.
5. Zakharov V.S., Guskov O.V., Prokhorov A.N., Berezhnoy V.N. Computational and experimental study of the influence of the shape of nozzle supersonic part on the flow structure in the gas-dynamic flow path of a model high-altitude test facility // Thermophysics and Aeromechanics, 2021, 28(2), C. 153–173.
6. Кукшинов Н.В., Мамышев Д.Л. Расчетное исследование горения водородно-воздушной смеси в модельном канале при ударно-волновой структуре течения // Теплофизика высоких температур, 2022. - Т. 60, № 5. - С. 763-773.

K.Yu. Arefiev¹, O.V. Guskov², D.L. Mamyshev²

¹ Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov,
Russia, 111116, Moscow, Aviamotornaya, 2

**ANALYSIS OF THE INFLUENCE DIFFERENT METHODS
HYDROGEN SUPPLY ON THE PARAMETERS A HIGH-SPEED
REACTIVE FLOW IN A MODEL CHANNEL**

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПРОТИВОТОЧНЫХ ЗАКРУЧЕННЫХ СТРУЙ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

В настоящее время большое внимание уделяется исследованию газодинамических характеристик в противоточных камерах. Анализ имеющихся экспериментальных и расчетных результатов говорит о том, что противоточные устройства являются более экономичными, позволяют организовать рабочий процесс на различных видах топлива. Вихревой принцип закрутки потока, применяемый в них, активно используется во многих технических устройствах. Значительное влияние на газодинамические параметры противоточных камер оказывают геометрические характеристики выходного сопла.

Применение противоточных закрученных течений в качестве элементов массивов даёт возможность обеспечения их высокой производительности с энергетической, экономической и экологической точки зрения.

Исходя из этого, целями данной работы является анализ влияния геометрии выходного сопла на структуру противоточного течения и изучение возможности его применения в рамках массивов.

Изучение особенностей движения течения осуществлялось на 3 моделях противоточных устройств. Модели имели полностью идентичные характерные размеры, различие моделей состояло в разной геометрической форме сопла. (Рисунок 1)

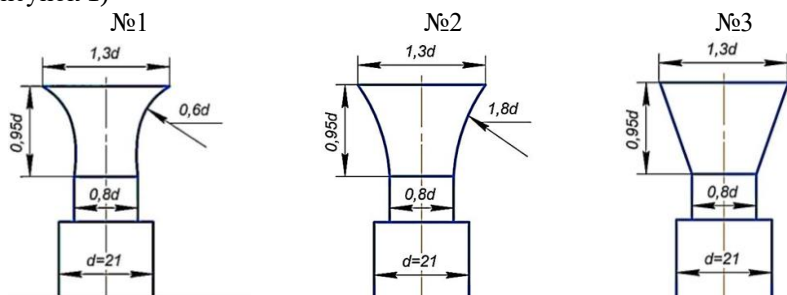


Рис. 1. Схемы сопел моделей противоточных камер: а) модель №1 б) модель №2 в) модель №3

В ходе эксперимента в камеру подавался воздух с различным массовым расходом: 1,5 г/с и 3 г/с. Массовый расход воздуха измерялся при помощи кориолисового массового расходомера.

Для обработки и анализа результатов режимы работы были связаны с числом Рейнольдса, которое изменялось в зависимости от суммарного расхода воздуха в диапазоне от 5000 до 10000.

В результате работы с помощью экспериментального метода PIV было выявлено, что геометрия сопла, и в частности – радиус скругления его профилированной части, значительно влияют на основные параметры истекающего противоточного течения. Была изучена зависимость газодинамических характеристик противоточной закрученной струи от геометрической формы сопла.

Результаты экспериментов показали, что модель №2 с профилированной формой сопла имеет более стабильное вихревое течение по сравнению с двумя другими моделями, что подтверждается распределениями относительной осевой и полной скоростей потока, согласно которым обеспечивается высокая равномерность течения на выходе из сопла второй модели. Это позволяет сформировать необходимые условия для интенсивного взаимодействия с соседними струями массива.

Таким образом, анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что закрученный поток, формирующийся в конструкции модели №2, может быть эффективно использован для последующей реализации течения в массивах с целью обеспечения требуемой эффективности горения.

Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение фундаментальных научных исследований (шифр научной темы FSSG-2023-0002).

Список литературы

1. Евдокимов О.А., Пиралишвили Ш.А., Гурьянов А.И., Веретенников С.В. Исследование малоразмерного реактивного двигателя на основе вихревой противоточной горелки // Тепловые процессы в технике, 2020. Т.12. №10. С.465–472
2. Евдокимов О.А. Научные основы организации горения в массивах противоточных и комбинированных закрученных струй, 2022. - С. 219–242
3. Badernikov, A.V. Results of Numerical Modeling of Combustion Processes in a Vortex Chamber / Badernikov A.V., Piralishvily S.A., Guryanov A.I. ; //MATEC Web Conf. 2018. V. 209. P. 00023. DOI: 10.1051/mateconf/201820900023

E. S. Matyash ¹, O. A. Evdokimov ¹

¹ P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University,
Russia 152934, Rybinsk, Pushkin St., 53

FORMATION OF THE STRUCTURE OF BIDIRECTIONAL SWIRLING JETS FOR INTENSIFICATION OF FUEL COMBUSTION

Е. В. Садикова^{1,2}, Д. С. Пашкевич^{1,2}, В. В. Капустин^{1,2,3}, Т. А. Федорова^{1,2}

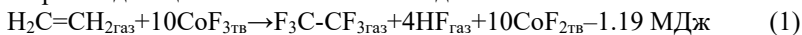
¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29;

²ООО "Аврора Кемикалс", Россия, 636000, г. Северск, Автодорога, 14/19, стр. 73, 12;

³Акционерное общество «Российский научный центр „Прикладная химия (ГИПХ)“», Россия, 193232, Санкт-Петербург, ул. Крыленко, 26А

РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛООВОГО ВЗРЫВА ДЛЯ ПРОЦЕССА ФТОРИРОВАНИЯ ЭТИЛЕНА И ФТОРЭТАНОВ ТРИФТОРИДОМ КОБАЛЬТА НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТАННЫХ КИНЕТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭТИХ ПРОЦЕССОВ

Гексафторэтан (далее ГФЭ) является газообразным носителем фтора для травления кремния и его соединений в промышленности полупроводников. Один из способов синтеза ГФЭ – фторирование этилена трифторидом кобальта, сопровождающееся высоким тепловыделением:

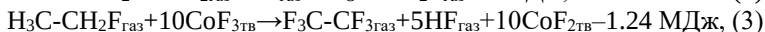
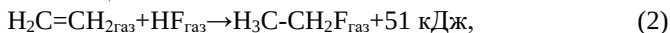


которое обычно проводят при температуре порядка 250-450 °С при этом адиабатический разогрев продуктов (1) составляет $\Delta T_{\text{ад}}=1030\text{ К}$.

Согласно выполненным расчётам, ГФЭ в условиях синтеза не является термодинамически равновесным веществом, поэтому процесс (1) целесообразно проводить в стационарном тепловом режиме при выше указанной температуре, избегая теплового взрыва. Поэтому было проведено расчётное исследование параметров (1) (характерный размер реакционного сосуда, теплопроводность реагирующей смеси, коэффициент теплоотдачи к стенке реактора, давление), при которых тепловой взрыв исключён, на основании приближённой теории теплового взрыва Д.А. Франк-Каменецкого [1].

В [2-3] представлены результаты исследования скорости фторирования этилена и фторэтанов трифторидом кобальта в изотермических условиях, но отсутствуют формально кинетические модели данных процессов.

Поэтому были построены зависимости $\ln K = f(T^{-1})$ для начальных участков кривых зависимости глубины превращения C_2H_4 и $\text{C}_2\text{F}_n\text{H}_m$ от времени, когда глубиной превращения исходных веществ можно пренебречь. На основе этих зависимостей проведены расчеты энергии активации и предэкспоненциального множителя для исследованных реакций. Показано, что при фторировании этилена реализуются два процесса с существенно различными значениями энергии активации:



Для (2) характерное значение энергии активации составляет 102 кДж/моль, для (3) -19-48 кДж/моль. Процесс (2) является эндотермическим, поэтому расчёты теплового взрыва были проведены для процесса (3), для которого $\Delta T_{ад}=1024$ К. Тепловой эффект и энергия активации (3) достаточно высоки для применения приближённой теории теплового взрыва [1].

Расчётами показано, что при теплопроводности 0.081 Вт/(м·К), которая характерна для порошков фторидов кобальта, при стехиометрическом соотношении компонентов в (3) стационарный тепловой режим фторирования реализуется в цилиндре диаметром не более 10^{-3} при температуре стенки 200 °С. В этом случае начальное давление монофторэтана составляет 3.9 МПа. При начальном давлении монофторэтана 0.1 МПа и $T_{ст} = 200$ °С критический диаметр цилиндра составляет величину порядка 10^{-2} м. Для цилиндра диаметром порядка десятков сантиметров стационарный тепловой режим при $T_{ст} = 200$ °С реализуется при начальном давлении монофторэтана 0.1 МПа и теплопроводности реагирующей смеси порядка 10 Вт/(м·К) или коэффициенте теплоотдачи от реагирующей среды к стенке цилиндра порядка 100 Вт·м⁻²·К⁻¹.

Указанные значения теплопроводности могут быть достигнуты при формировании в порошке высокотеплопроводной структуры, например из алюминия, в которой характерный размер переноса тепла будет составлять единицы миллиметров, а коэффициента теплоотдачи – при перемешивании порошка.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 24-91-18003.

Список литературы

1. Д.А. Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике, 3 издание. М. Наука. 1987.
2. Пашкевич Д.С., Костяев Р.А. Десорбция продуктов реакции в процессе фторирования этилена трифторидом кобальта. ЖПХ. Т.67. № 10. 1994. С.1624-1629.
3. Костяев Р.А., Пашкевич Д.С. Роль фтороводорода и дифторида кобальта в процессах фторирования углеводородов трифторидом кобальта. ЖПХ. Т.67. № 12. 1994. С.2012-2016

E. V. Sadikova^{1,2}, D. S. Pashkevich^{1,2}, V. V. Kapustin^{1,2,3}, T. A. Fedorova^{1,2}

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

²LLC Aurora Chemicals, Russia, 636000, Seversk, Highway, 14/19, p. 73, 12;

³Actional Society "Russian Scientific Center "Applied Chemistry (GIPH)"" ,Russia, 193232, St. Petersburg, ul. Krylenko, 26A

**CALCULATION OF THERMAL EXPLOSION PARAMETERS
FOR THE FLUORINATION OF ETHYLENE AND
FLUOROETHANES WITH COBALT TRIFLUORIDE BASED ON
THE DEVELOPED KINETIC MODELS OF THESE PROCESSES**

И.Д. Белоножко¹, М. Н. Сергеев¹

¹ Рыбинский государственный авиационный технический
университет имени П. А. Соловьева,
Россия, 152934, Рыбинск, ул. Пушкина, 53

ВЗРЫВНОЙ РАСПЫЛ ТОПЛИВА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ НА РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ ПРИСАДКИ

Распыливание жидкостей является одним из важнейших процессов, которые используются при разработке жидкостно-реактивных, воздушно-реактивных двигателей. Одним из перспективных и современных способов улучшения распыла является взрывной распыл [1]. Основная идея взрывного распыла состоит в том, что формируется двухкомпонентные капли, внутренняя часть которых состоит из воды, а внешняя из топлива, например, керосин [2]. При термическом воздействии на такую каплю, происходит перегрев воды и далее процесс кипения перегретой жидкости носит взрывной характер, в результате которого окружающая воду пленка топлива дробится на мелкие вторичные фрагменты.

Важнейшим звеном этого процесса является перегрев жидкости. В данной работе для осуществления этого процесса предлагается ввести внутрь жидкости микро или наночастицу материала, восприимчивого к СВЧ-излучению. В результате процесс взрывного распыла будет проходить в 3 этапа. Сначала СВЧ излучение действует на наночастицу, разогревая её, тепло от частицы передается к воде и далее вода вскипает, осуществляя взрывную деформацию топлива (рис. 1)

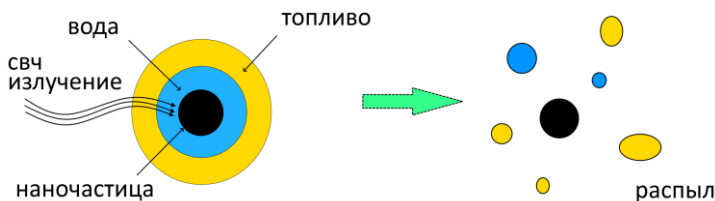


Рис. 1. Схема взрывного распыла при СВЧ активации

В качестве присадочной компоненты необходимо использовать вещества, восприимчивые к СВЧ излучению. Такими веществами являются графит, уголь, а также магнитные вещества, содержащие железо. Таким образом композитное топливо, предлагаемое в данной работе, можно считать магнитной наножидкостью. Необходимо отметить, что эффективность микро-взрывов или паффинга, который также может реализовываться в таких усло-

виях существенным образом зависит от характеристик СВЧ излучения, то есть от частоты и его интенсивности. Процесс взрывного дробления капель может иметь каскадный характер. Сущность его состоит в том, что после первого дробления освободившиеся наночастицы могут попасть в нераздробленные капли топлива и далее опять подвергнуты СВЧ излучению. Таким образом процесс интенсификации дробления капель представляется целесообразным проводить в импульсном режиме. Определяющими процесс дробления с термодинамической точки зрения является динамика процесса переноса энергии излучения от частицы к воде и далее к топливу.

Технически, предлагаемая технология приводит к добавлению в камеру сгорания участка СВЧ излучения. Кроме инициализации вторичного дробления капель появляется дополнительная степень свободы управления факелом распыла с помощью электрических и магнитных полей. Такая технология может быть использована для улучшения характеристик работы ракетных и авиационных двигателей.

Список литературы

1. Антонов Д.В., Федоренко Р.М., Стрижак П. А. Коллективные эффекты при формировании вторичных фрагментов в результате микровзрывной фрагментации композиционных топлив // Горение и взрыв. – 2022. – Т. 15. – № 2. – С. 22–33.
2. Антонов Д.В., Вершинина К.Ю., Федоренко Р.М. Микро-взрывная фрагментация двухжидкостных капель на основе талового масла // Письма в ЖТФ. – 2023. Т. 49. №. 14. – С. 3–7.

I.V. Belonozhko¹, M. N. Sergeev¹

¹ P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University,
Russia 152934, Rybinsk, Pushkin St., 53

EXPLOSIVE FUEL SPRAYING UNDER THE INFLUENCE OF MICROWAVE RADIATION ON RADAR-ABSORBING ADDITIVES

И.А. Бурцев¹, Н.А. Ренетий², Д.А. Коновалов^{1,2}

¹ Воронежский государственный технический университет,
Россия, 394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

² Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Россия, 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1.

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ГАЗИФИКАЦИИ RDF-ТОПЛИВА

Проблема генерации и накопления твердых коммунальных отходов актуализируется с каждым годом. Как правило по мере того, как страны становятся богаче, темпы индустриализации и урбанизации растут, меняются жилищные условия и модели потребления, на рынке появляется более широкий ассортимент товаров, это, в свою очередь, приводит к увеличению среднего количества образующихся ТКО на одного человека и как следствии абсолютного.

Термическая переработка ТКО - процесс переработки отходов, который осуществляется путем нагрева их до высоких температур (300-1500 °С) с целью разложения органических материалов и преобразования их в более стабильные соединения, а также для извлечения ценных материалов и производства энергии. В данной работе исследуется процесс газификации RDF-топлива (топливо, которое получают из мусора и отходов, прошедших первичную сортировку) с помощью гибридного кинетико-термодинамического подхода.

Авторами было рассмотрено четыре значения объемной доли кислорода в окислите из-за следующих соображений:

- $K_{O_2} = 0,138$ – минимальное значение доли кислорода, необходимого для термических процессов (горение, пиролиз, газификация);

- $K_{O_2} = 0,21$ – стандартное дутье;

- $K_{O_2} = 0,38$ – кислородная мембрана;

- $K_{O_2} = 0,997$ – чистый технический кислород [1].

Опираясь на результаты полученные в результате расчетов нельзя сделать однозначный вывод, какое значение объемной доли кислорода в окислителе будет оптимальное для процесса газификации, так как с увеличением K_{O_2} увеличивается процентное содержание монооксида углерода (а так же его удельный выход на кг RDF-топлива) и водорода в генераторном газе, но уменьшается удельный выход водорода на кг RDF-топлива – эти факторы являются противоборствующими (рис.1).

В дальнейшем при моделировании процесса оптимизации будет учтено какая доля газа (H_2 или CO_2) в синтез-газе будет приоритетной в зависимости от цели его дальнейшего использования (синтез аммиака, метилового спирта и пр.).

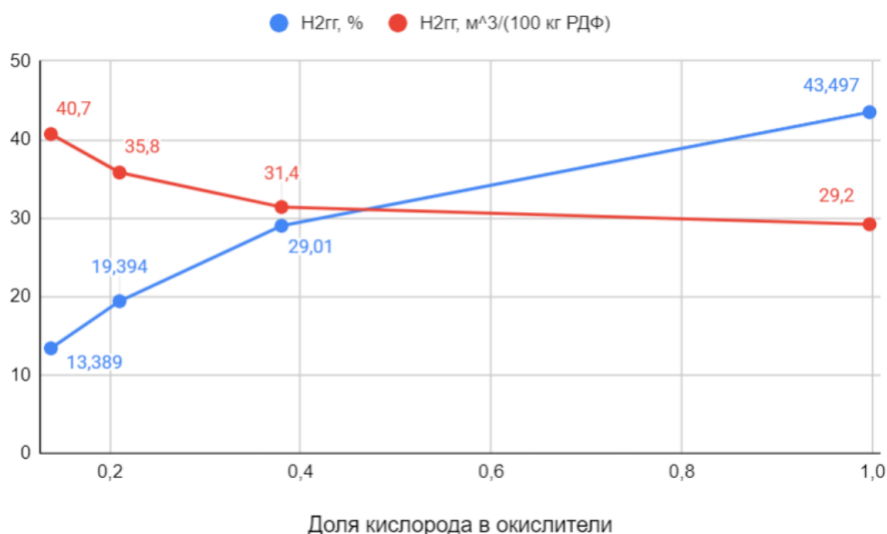


Рис. 1. Зависимость $H_{2гг} (\%)$, $H_{2гг} (м^3 \text{ на } 100 \text{ кг RDF-топлива})$ от объемной доли кислорода в окислителе

Список литературы

1. Павлечко В.Н., Францкевич В.С. Влияния концентрации кислорода на процесс сжигания газообразного топлива // Труды БГТУ, 2018. - №2. - С. 100-105.

I. A. Burtsev¹, N. A. Repetiy², D. A. Konovalov^{1,2}

¹ Voronezh State Technical University,

Russia 394006, Voronezh, 20 Let Oktyabrya str., 84

² National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,

Russia, 111250, Moscow, st. Krasnokazarmennaya, 14, building 1.

SELECTION OF OPTIMIZATION PARAMETERS FOR MATHEMATICAL MODELING OF THE RDF-FUEL GASIFICATION PROCESS

И.О. Воробьев¹, О.А. Евдокимов¹

¹ Рыбинский государственный авиационный технический
университет имени П. А. Соловьева,
Россия, 152934, Рыбинск, ул. Пушкина, 53

ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ И ПЛАМЕНИ В ВИХРЕВОМ ПРОТИВОТОЧНОМ ГОРЕЛОЧНОМ УСТРОЙСТВЕ

Закрутка потока является одним из часто используемых способов интенсификации процессов газодинамики, теплообмена и горения. Применение закрутки потока в горелочных устройствах приводит к значительному сокращению протяженности зоны горения, а также к уменьшению выбросов загрязняющих атмосферу веществ [1].

Противоточные вихревые горелочные устройства обладают более перспективными характеристиками с точки зрения диапазона устойчивой работы, полноты сгорания топлива и эмиссионных свойств. Существующие результаты экспериментальных исследований показали возможность и эффективность применения в противоточных горелочных устройствах практически любых видов топлива [2]. Проведение исследований горения в противоточных вихревых устройствах является актуальным и позволит получить массив фундаментальных данных, а последующее сопоставление результатов с известными интегральными характеристиками даст возможность дополнительно повысить эффективность горелочных устройств.



Рис.1. Противоточное вихревое горелочное устройство

В работе проведены исследования, направленные на визуализацию положения фронта пламени, температуры и скорости течения, формирующегося в противоточном вихревом горелочном устройстве.

Для проведения эксперимента разработано горелочное устройство, состоящее из двух зон с диаметрами $d_1=100$ мм, $d_2=26$ мм. Устройство изображено

на рисунке 1. Для визуализации структуры течения и зоны горения некоторые элементы конструкции выполнены прозрачными из кварцевого стекла. Эксперимент проводился при различных значениях коэффициента избытка воздуха и числа Рейнольдса воздушного потока. Были проведены исследования на различных видах газообразного топлива, а в качестве окислителя был использован воздух. Для определения характеристик горения внутри устройства также было выполнено численное моделирование. Результаты показали, что наибольшие значения температуры достигаются в центре фронта пламени, что показано на рисунке 2. Изменение режима горения приводит к смещению локализации зоны горения в диапазоне от полностью внешнего до полностью внутреннего сгорания.

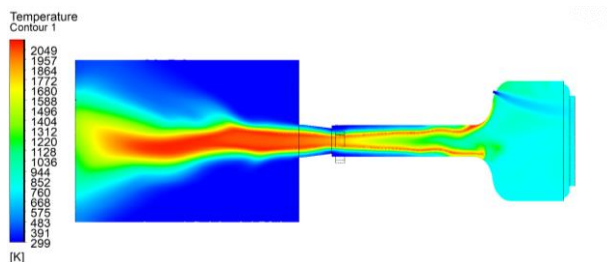


Рис.2. Температура внутри горелочного устройства

Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение фундаментальных научных исследований (шифр научной темы FSSG-2023-0002).

Список литературы

1. Guryanov A.I. et al. Criterion analysis and experimental study of combustion mechanisms in a bidirectional swirling flow and their relationship with pollutants emission // Int J Energy Res. 2021. Vol. 45, № 4. P. 5500–5516.
2. Guryanov A.I. et al. An experimental study of syngas combustion in a bidirectional swirling flow // International Journal of Hydrogen Energy. 2022. P. S036031992205162X.

I.O. Vorobyev¹, O.A. Evdokimov¹

¹ P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University,
Russia 152934, Rybinsk, Pushkin St., 53

A STUDY OF THE FLOW AND FLAME STRUCTURE IN VORTEX BIDIRECTIONAL COMBUSTION CHAMBER

И.А. Благушин¹, С.В. Веретенников¹, А.В. Тарасов¹

¹ Рыбинский государственный авиационный технический
университет имени П. А. Соловьева,
Россия, 152934, Рыбинск, , ул. Пушкина, 53

ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ СЖИГАНИИ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА В ПРОТИВОТОЧНОМ ЗАКРУЧЕННОМ ТЕЧЕНИИ

В работе проведены исследования направленные на скоростную визуализацию положения фронта пламени, совмещённую с измерением спектра акустического излучения пламени, формирующегося в противоточном закрученном течении.

Для проведения эксперимента разработана ПВГУ с тремя различными цилиндрическими частями диаметра 30 мм, длиной $l_{k1}=80$ мм, $l_{k2}=120$ мм и $l_{k3}=180$ мм.

Эксперимент проводился на бедном и богатом режимах горения, изменялся только расход топлива на входе в горелочного устройство и длина цилиндрического канала.

Режим по коэффициенту избытка воздуха выставлялся за счёт изменения расхода топлива. В качестве окислителя использовался воздух, подающийся в вихревую камеру ПВГУ через закручивающие устройство, в торцевую часть подавалось топливо (пропан).

Эксперимент варьировался при коэффициентах избытка воздуха $l_{k1}/d=2,6$; 1, 0,693; $l_{k2}/d=4$; 1,44, 0,756; $l_{k3}/d=6$; 2,036, 0,772.

В ходе эксперимента осуществлялась запись звукового сигнала, при помощи микрофона, установленного на расстоянии 0,5 м от соплового-выхода ПВГУ, также производилась высокоскоростная съёмка процесса горения в цилиндрической части ПВГУ на высокоскоростную камеру.

Входе проведения эксперимента выявлено, что на горелочном устройстве с цилиндрической частью калибра $l_{k2}/d=4$ наблюдались пульсации пламени с частотой от 23 до 36 Гц.

Самое устойчивое горение имеет ПВГУ цилиндрической частью калибра $l_{k1}/d=2,6$. Так же выявлено, что на первой и третьей геометрии ПВГУ на первом режиме горения образуется фронт пламени цилиндрической формы упирающийся в торцевую стенку вихревой камеры.

Исследования режимов горения на различных коэффициентах избытка воздуха показали, что при бедном режиме горения фронт пламени находится в цилиндрической части горелочного устройства и наблюдалась не большая часть фронта пламени на выходе из сопла. При увеличении расхода топлива фронт пламени выходит наружу горелочного устройства и находится полностью во внешней среде.

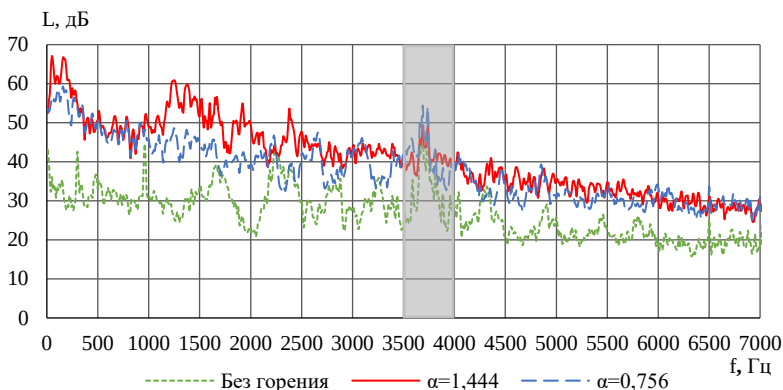


Рис.1. Акустические характеристики ПВГУ калибра $l_{\text{к2}}/d=4$

При этом наблюдались изменения акустических характеристик. В отличие от изотермического течения, наблюдалось увеличение средне интегрального уровня шума для всех режимов горения. При этом на бедных режимах горения наблюдалось появление локальных максимумов на частотах 1200 Гц, 2200 Гц и 3000 Гц. На богатых режимах горения уровень шума не имеет четко выраженных максимумов, это связано с тем, что горение происходит во внешнем факеле и в основном слышен турбулентный шум. При реализации бедного режима горения происходит взаимодействие противоточной вихревой структуры с фронтом пламени внутри цилиндрической части, которые вызывают дополнительные локальные пульсации, связанные с прецессией вихревого ядра потока и наложения колебаний.

С увеличением длины вихревой камеры средне интегральный уровень шума снижается.

Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение фундаментальных научных исследований (шифр научной темы FSSG-2023-0002.

I.A. Blagushin¹, S.V. Veretennikov¹, A.V. Tarasov¹

¹ P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University,
Russia 152934, Rybinsk, Pushkin St., 53

INVESTIGATION OF ACOUSTIC RADIATION DURING COMBUSTION OF GASEOUS FUEL IN A COUNTERCURRENT SWIRLING COURSE

А.И. Гурьянов¹, И.И. Титова¹, П.А. Соколов¹

¹ Рыбинский государственный авиационный технический
университет имени П. А. Соловьева,
Россия, 152934, Рыбинск, ул. Пушкина, 53

ФОРМИРОВАНИЕ ЗАКРУЧЕННЫХ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ В ПРОТИВОТОЧНОМ ГОРЕЛОЧНОМ УСТРОЙСТВЕ

Исследование посвящено изучению формирования закрученных воздушных потоков в противоточном горелочном устройстве при изменении давления на входе. Цель работы — создание пакета данных, позволяющего детально изучить характеристики закрученных потоков и их зависимость от входного давления. В рамках исследования проведен аналитический обзор существующих работ в области закрученных потоков, разработана модель движения воздуха в горелочном устройстве, учитывающая его геометрию и рабочие параметры. На основе численного моделирования в программе ANSYS изучены особенности газодинамики течения воздуха при изменении давления на входе в закручивающее устройство с 1.1 до 2.0 атмосфер, включая распределение осевой и полной скорости, а также формирование рециркуляционных зон. Результаты показали, что увеличение давления на входе приводит к росту скорости потока и усилению турбулентности, что способствует более интенсивному перемешиванию и формированию устойчивой центральной рециркуляционной зоны. Максимальная скорость потока наблюдается на выходе из закручивающего устройства, с последующим снижением по мере движения вдоль цилиндрической части горелки. При увеличении давления на входе с 1.1 до 2.0 атмосфер наблюдается рост осевой скорости потока, что подтверждает зависимость динамики потока от входного давления. Также выявлено, что закрутка потока приводит к образованию зон с различными скоростями и направлениями течения, что важно для оптимизации процессов горения.

Полученные данные могут быть использованы для оптимизации конструкций горелочных устройств, повышения их эффективности и снижения энергозатрат.

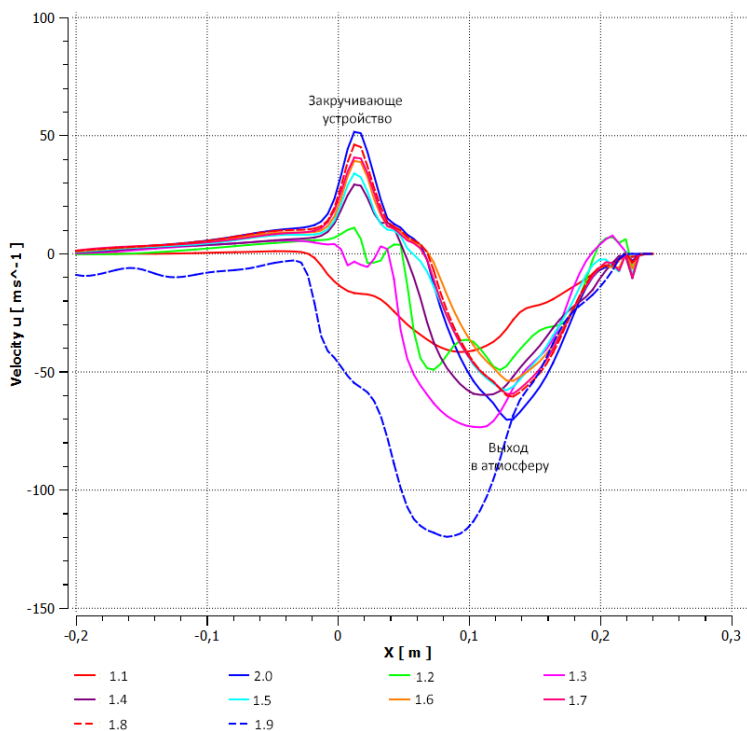


Рис. 1. Распределение осевой скорости в горелочном устройстве при давлении от 1.1-2.0 атмосфер

Список литературы:

1. Пиралишвили Ш. А. и др. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения. М.: УНПЦ «Энергомаш», 2000.
2. Гурьянов А. И. и др. Газодинамика и горение в противоточном закрученном течении. Рыбинск: ИП Махоротов К.В., 2022.
3. Jinli Song, Nabil Kharoua, Mohamed Alshehhi. Numerical Simulation of Turbulent Swirling Pipe Flow with an Internal Conical Bluff Body // Fluid Dynamics & Materials Processing. 2021. № 17(2).

A.I. Guryanov¹, I. I. Titova¹, P.A. Sokolov¹

¹Rybinsk State Aviation Technical University named after P. A. Solovyov

FORMATION OF SWIRLING AIR FLOWS IN A BIDIRECTIONAL COMBUSTOR

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПАДА СТРУИ ЖИДКОСТИ В ПОПЕРЕЧНОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА

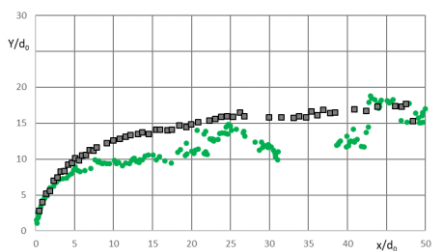
Характер распыла жидкого топлива играет значимую роль в процессе сжигания жидкого топлива, поскольку определяет экологические характеристики камеры сгорания. При этом активно развивается применение оптических бесконтактных методов измерения для изучения и оптимизации работы форсунок, которые широко распространены не только в области тяжелого машиностроения. В рамках экспериментального исследования [1] бесконтактными методами изучается боковой сдвиг струи жидкости воздухом.

Численное моделирование всё чаще применяется для получения основного ряда характеристик данных по распылению форсунок. Стоит отметить, что применение численных подходов зачастую обусловлено необходимостью выполнения валидационных исследований для применения той или иной модели в конкретной задаче.

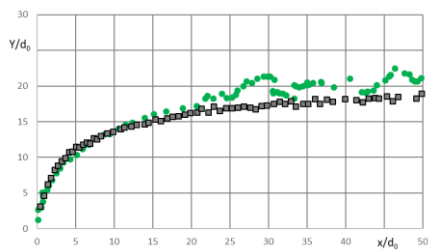
В рамках данной работы выполнено численное моделирование на основе *URANS SST* модели турбулентности с применением *VOF-to-DPM* подхода, а также с *Kelvin-Helmholtz Rayleigh-Taylor* моделью вторичного распада и последующий сопоставительный анализ результатов моделирования с данными бесконтактных оптических измерений [1]. В качестве основных характеристик рассмотрены параметры капель в структуре потока: характерный размер частиц, распределение частиц по размерам и траектория движения частиц. Для этого рассмотрены 2 режима вдува: $We=1000$, $q=20$ и $We=750$, $q=10$ (по критерию Вебера и коэффициенту импульса жидкостей). Общая структура течения представлена на рисунках 1 и 2.



Рис. 1. Результаты численного моделирования режима $We=1000$, $q=20$



$We=750, q=10$



$We=1000, q=20$

Рис. 2. Сопоставление траектории струи жидкости при поперечном обдуве воздуха:

● - траектория на основе численного моделирования, ■ - траектория [1]

Данная модель демонстрирует отклонение в величине диаметра Розина-Раммлера для рассмотренных двух режимов до 17% (таблица 1).

Табл. 1. Сопоставление характерного размера частиц жидкости в сечении $x/d_0 = 50$:

	Экспериментальные данные [1]	Численное моделирование
D_e , мкм $We=750$	40,86	33,8
D_e , мкм $We=1000$	38	43

Кроме того, получено хорошее соответствие в распределении капель в поперечном сечении на расстоянии $x/d_0 = 50$ калибров от впрыска жидкости

Результаты данной работы демонстрируют возможность применения *VOF-to-DPM* подхода для получения качественного и количественного соответствия характеристик распыления, в частности, траектории движения плёнки, характерного диаметра частиц, а также кривой распределения капель по размерам. Полученные данные могут быть положены в основу разрабатываемого подхода к численному моделированию рабочего процесса камер сгорания авиационных газотурбинных двигателей, работающих на жидком топливе.

Список литературы

1. Song J., Cary Cain C., Guen Lee J. Liquid Jets in Subsonic Air Crossflow at Elevated Pressure // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2015. Vol. 137, № 4. P. 041502.

K. E. Veselov¹, O.A. Evdokimov¹

¹ P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University,
Russia 152934, Rybinsk, Pushkin St., 53

NUMERICAL SIMULATION OF THE LIQUID JET DECOMPOSITION IN A TRANSVERSE AIR FLOW

К. Д. Лавронов, Д. К. Шараборин, Р. В. Толстогозов, В. М. Дулин

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАМЕНИ БУНЗЕНА В СЛАБОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ ПАНОРАМНЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

В настоящее время активно исследуется влияние внешнего электрического поля на газовые потоки с горением. Актуальность данного направления обусловлена возможностью использования электрического поля для управления процессами горения, что способствует повышению энергоэффективности и стабилизации пламени. Несмотря на высокую эффективность данного метода, вопрос о влиянии различных механизмов в этом явлении остается предметом научных дискуссий. Так, указывается, что внешнее электрическое поле может вызывать ионный ветер между электродами, в некоторой степени увеличивать температуру газа перед фронтом пламени, напрямую воздействовать на заряд в ионизированном газе в окрестности фронта пламени [1].

В данной работе был использован метод плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции (англ.: planar laser-induced fluorescence, PLIF) для оценки поля температуры за фронтом пламени. Количественная оценка локальной температуры выполнена на основе значения отношения интенсивности флуоресценции при возбуждении двух линий перехода. Метод PLIF был применен к молекулам гидроксильного радикала (ОН) для линий возбуждения $Q_1(5)$ и $Q_1(14)$ перехода (1-0) электронной системы $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$. По данным предыдущих исследований [2], данная пара соответствует наибольшей чувствительностью к температуре, а также обеспечивает хорошее совпадение со значениями, полученными другим методами [3]. Для измерения распределения скорости в потоке был использован метод анемометрии по изображениям частиц (англ.: particle image velocimetry, PIV), который позволяет определить двухкомпонентное поле скорости в освещаемой плоскости на основе смещения частиц-трассеров по паре изображений, полученных при двух вспышках лазера с известным интервалом по времени.

Экспериментальный стенд включал в себя осесимметричное профилированное сопло с внутренним диаметром $d = 15$ мм, с возможностью подачи предварительно перемешанной метано-воздушной смеси. Параметры потока составляли $Re = 1000$, коэффициент избытка топлива $\varphi = 0.92$. Однородное поперечное электрическое поле было организовано с помощью двух параллельных плоских металлических пластин. Пластины были подключены к

источнику постоянного напряжения, что позволяло достичь напряженность электрического поля $E = 62.5$ кВ/м между ними. Для реализации метода Two-line OH PLIF использовалась система из импульсного лазера накачки и перестраиваемого импульсного лазера на красителе (родамин 6G). С помощью интенсифицированной камеры, оснащенной кварцевым объективом, была произведена регистрация сигнала флуоресценции линий (1-1) и (0-0) в диапазоне 300-320 нм. Измерительная система метода PIV включала в себя ПЗС-камеру, импульсный лазер. Камера, оснащенная объективом с узкополосным оптическим фильтром ($532 \text{ нм} \pm 5 \text{ нм}$).

В работе представлены визуализация, оценки поля температуры и поля скорости для конусного пламени при наличии внешнего электрического поля и без него. Результаты исследования показывают, что воздействие электрического поля существенно изменяет структуру потока, вызывая искривление фронта пламени и его смещение в сторону катода, а также изменяя распределение скорости за фронтом пламени. В то же время анализ температурного поля продемонстрировал, что электрическое поле не оказывает значимого влияния на распределение температуры за фронтом пламени.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 25-49-00233).

Список литературы

1. Kuhl J. et al. On the effect of ionic wind on structure and temperature of laminar premixed flames influenced by electric fields //Combustion and Flame. – 2017. – Т. 176. – С. 391-399.
2. Lobasov A. S. et al. On the efficiency of using different excitation lines of (1–0) two-line OH fluorescence for planar thermometry //Thermophysics and Aeromechanics. – 2021. – Т. 28. – №. 5. – С. 751-755.
3. Devillers R., Bruneaux G., Schulz C. Development of a two-line OH-laser-induced fluorescence thermometry diagnostics strategy for gas-phase temperature measurements in engines //Applied optics. – 2008. – Т. 47. – №. 31. – С. 5871-5885.

K. D. Lavronov, D. K. Sharaborin, R. V. Tolstoguzov, V. M. Dulin

Kutateladze Institute of Thermophysics,
Russia 630090, Novosibirsk, Lavrentyev ave., 1

EXPERIMENTAL STUDY OF A BUNSEN FLAME IN A WEAK DC ELECTRIC FIELD BY PLANAR OPTICAL METHODS

М.А. Малешина¹, В.Н. Ковальников¹, В.В. Шеркунов¹

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩЕГО ТОПЛИВА

Введение. В последние годы всё большее распространение среди стран всего мира имеет стремление к переходу в углеродно-нейтральное состояние. Исследования в области применения водорода в топливных смесях стали важной частью перехода к безуглеродной энергетике будущего. В 2021 году Правительством РФ была утверждена «Концепция развития водородной энергетики в РФ», которая определяет ключевые задачи на долгосрочный период до 2035 года, а также основные ориентиры на перспективу до 2050 года.[1,2]

Снижение выбросов оксидов углерода требует оптимизации процессов сжигания традиционных топлив. В сравнении с традиционными углеводородными топливами водородосодержащие имеют ряд особенностей: высокую теплоту сгорания, низкий предел энергии активации при сжигании в воздухе, более высокую скорость распространения пламени. Кроме того, существующая инфраструктура установок на природном газе без трудностей адаптируется под водородосодержащие смеси.[3]

Компьютерное моделирование. Авторами проведено моделирование процесса горения водородосодержащего топлива с содержанием 78% метана и 22% водорода.

Область моделирования процесса горения состоит из 4,5 млн ячеек нескольких размерных видов. Математическое описание включает в себя k-ε модель турбулентности, осредненное по Рейнольдсу уравнение Навье-Стокса (RANS) и FGM модель – для описания процесса горения компонентов.

На рисунке 1 показаны результаты моделирования горения чистого метана и метановодородной смеси с 22% содержанием водорода.

В ходе моделирования было выявлено повышение максимальной температуры процесса горения в случае с водородосодержащей топливной смесью, при этом происходит значительное снижение массовых долей эмиссии оксидов углерода CO и CO₂.

Закключение. Проведено сравнительное численное моделирование процесса горения метана и водородосодержащей смеси. Выявлены основные показатели эмиссии вредных выбросов при сжигании водородосодержащего топлива.

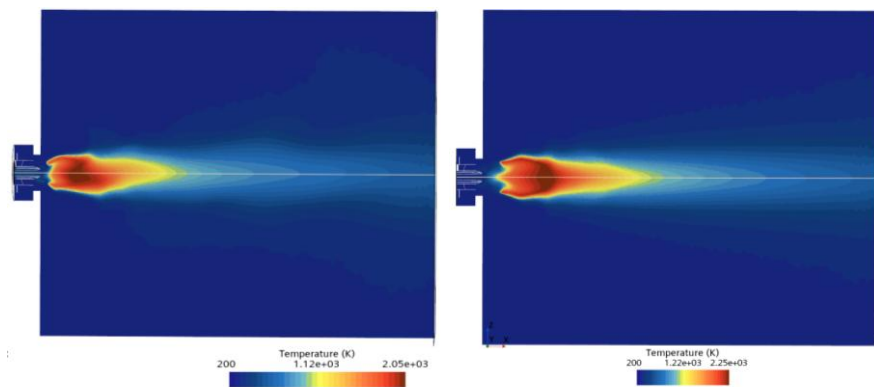


Рис. 1. Распределение температуры вдоль оси пламени в процессе горения топлива с содержанием водорода 0% и 22% соответственно.

Список литературы

1. Об утверждении Концепции развития водородной энергетики в Российской Федерации: Распоряжение Правительства РФ от 05.08.2021 N 2162-р (ред. от 21.10.2024)
2. Мастепанов, А. М. Водородная энергетика России: состояние и перспективы / А. М. Мастепанов // Энергетическая политика. – 2020. – № 12(154). – С. 54-65. – DOI 10.46920/2409-5516_2020_12154_54. – EDN UZWZGO.
3. Макарян, И. А. Метановодородные смеси как альтернативное экологически чистое топливо / И. А. Макарян, И. В. Седов, В. С. Арутюнов // Научный журнал Российского газового общества. – 2022. – № 2(34). – С. 76-94. – DOI 10.55557/2412-6497-2022-2-76-94. – EDN PZERFY.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Соглашения № 075-15-2021-584.

M.A. Maleshina¹, V.N. Kovalnogov¹, V.V. Sherkunov¹

¹ Ulyanovsk State Technical University,
Russia 432027, Ulyanovsk, st. Severny Venets, 32

MODELING OF HYDROGEN-CONTAINING FUEL COMBUSTION

ИЗУЧЕНИЕ РЕЖИМОВ ГОРЕНИЯ ПРОТИВОТОЧНОЙ ВИХРЕВОЙ ГОРЕЛКИ С ПОЛУСФЕРИЧЕСКОЙ КАМЕРОЙ СМЕШЕНИЯ

Вихревые устройства, включая противоточные вихревые горелки, широко применяются для сжигания газообразного, жидкого и твердого топлива, обеспечивая длительное пребывание компонентов топливовоздушной смеси в зоне высокой температуры и тепловую защиту стенок. Геометрия противоточных вихревых камер может быть цилиндрической, тороидальной, конической или полусферической. Первые три вида хорошо изучены, полусферическая требует детального исследования. Аналитические исследования показывают, что полусферическая геометрия может снизить тепловые потери и улучшить тепловую защиту стенок, сохраняя другие характеристики на требуемом уровне.

Для исследования была создана горелка с полусферической камерой смешения диаметром 70 мм и выходным расширяющимся соплом диаметром 30 мм. Исследовались срывы пламени богатой и бедной смеси на пропане и аммиаке.

Использование пропана как топлива выявило режимы горения с коаксиально расположенными кольцами пламени и границы устойчивого горения при избытке воздуха $8 \leq \alpha \leq 12$, открывая новые возможности для энергетических установок. Исследование показало три режима работы горелочного устройства с резким переходом между ними в зависимости от коэффициента избытка воздуха. При высоких значениях коэффициента избытка воздуха формируется диффузионное пламя ярко оранжевого цвета внутри камеры, связанное с малой скоростью топлива на срезе форсунки. При увеличении расхода топлива и импульса струи (рис. 2) топливо приобретает радиальную компоненту скорости и смешивается с окислителем в кольцевой области, разделяя приосевой и периферийный вихри. При избытке воздуха ($\alpha=5,8$) наблюдаются оба режима, но при высоких расходах воздуха переход резкий и скачкообразный. Дальнейшее увеличение тепловой мощности и расхода топлива формирует условия для полного предварительного смешивания топлива и окислителя внутри горелочного модуля при ($\alpha=2$), стабилизируя пламя в выходном сопле (рис. 1) в виде расширяющегося конуса, что соответствует внешнему горению перемешанной смеси. Разница режимов заключается в интенсивности горения и большем импульсе, достаточном для преодоления приосевого сопротивления, где замечен переход на другой режим горения с образованием яруса пламени вблизи сопла. Тепловизионное

исследование показывает, что максимальные температуры достигаются вблизи топливной форсунки (не более 60°C) из-за особенностей течения и пламени. Численное моделирование подтверждает наличие трех режимов горения с различной локализацией фронта пламени.



Рис. 1. Внешний режим горения



Рис. 2. Внутренний режим горения

Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение фундаментальных научных исследований (шифр научной темы FSSG-2023-0002).

Список литературы

1. Guryanov A.I. et al. Criterion analysis and experimental study of combustion mechanisms in a bidirectional swirling flow and their relationship with pollutants emission // Int J Energy Res. 2021. Vol. 45, № 4. P. 5500–5516.

O.M. Mazur, O.A. Evdokimov

¹ P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University,
Russia 152934, Rybinsk, Pushkin St., 53

INVESTIGATION OF COMBUSTION PROCESSES IN A COUNTERCURRENT VORTEX BURNER WITH A HEMISPHERICAL MIXING CHAMBER

О.С. Заводова¹, С.А. Сургучев¹, А.И. Гурьянов¹, О.А. Евдокимов¹

¹ Рыбинский государственный авиационный технический
университет имени П. А. Соловьева,
Россия, 152934, Рыбинск, , ул. Пушкина, 53

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ГОРЕНИЯ В ПРОТИВОТОЧНОМ ЗАКРУЧЕННОМ ТЕЧЕНИИ ПУТЕМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ИОНИЗАЦИИ ОКИСЛИТЕЛЯ

Процессы горения топлив составляют основу энергетики, транспорта, авиации, нефтегазовой области, высокотемпературных технологических процессов, сельского хозяйства и всей современной промышленности в целом. Это объясняет научный и практический поиск методов их стабилизации, повышения производительности и экологичности.

Возможным решением является специализированная подготовка и модификация как воздушной смеси, так и самого топлива. Такие технологии могут потенциально обеспечивать снижение выбросов NO_x и CO , прирост энергии и стабилизацию работы на более широком спектре режимов. Одним из них является ионизация. Ионизация является способом изменения качественных и количественных характеристик горения.

Экспериментальным путем было доказано, что предварительная ионизация обеспечивает увеличение коэффициента избытка воздуха в точке срыва пламени, что позволяет сделать процесс горения более устойчивым на бедных режимах горения. Проведенные экспериментальные исследования показали потенциал применения предварительной ионизации для интенсификации горения. Даже при малой массовой доле озона в воздушной смеси коэффициент избытка воздуха при срыве пламени увеличивается, что делает привлекательным дальнейшее исследование влияния ионизации на горение. Ионизации можно подвергнуть не только воздушные смеси, но и топливные, ионизировать смеси вне области воспламенения, в которых содержится горючее вещество и окислитель с концентрацией меньше нижнего предела распространения пламени. Интерес представляет также модифицирование озоном топливных смесей.

Применение ионизирующих технологий для воздухоподготовки и модификации топливных смесей охарактеризовано как перспективный метод интенсификации горения.

Одним из потенциальных направлений для применения ионизации является водородная энергетика, а именно решение задач нестабильного горения аммиака и аммиачных смесей.

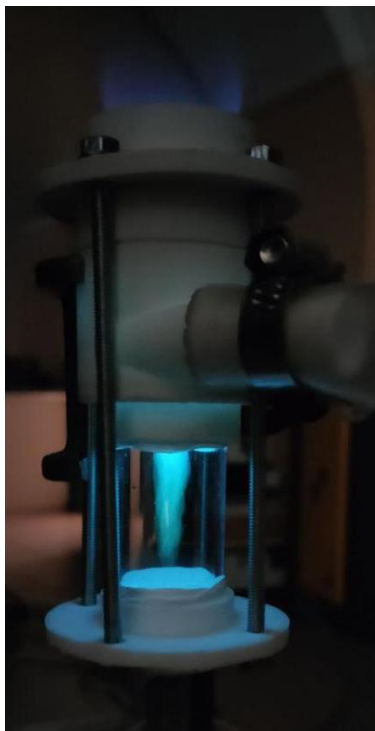


Рис. 1. Исследование границ устойчивого горения на горелочном устройстве

Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение фундаментальных научных исследований (шифр научной темы FSSG-2023-0002).

Список литературы

1. Badernikov, A. V., Guryanov, A. I., Evdokimov, O. A., & Veretennikov, S. V. (2022). A Study of Walls Thermal Conditions for a Bidirectional Vortex Combustor. *Heat Transfer Engineering*, 44(13), 1157–1170. <https://doi.org/10.1080/01457632.2022.2119924>

O.S. Zavodova¹, S.A. Surguchev¹, A.I. Guryanov¹, O.A. Evdokimov¹

¹ P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University,
Russia 152934, Rybinsk, Pushkin St., 53

**COMBUSTION INTENSIFICATION IN A BIDIRECTIONAL
SWIRLING FLOW BY PRE-IONIZATION**

П.А. Колганов¹, О.А. Евдокимов¹

¹ Рыбинский государственный авиационный технический
университет имени П. А. Соловьева,
Россия, 152934, Рыбинск, ул. Пушкина, 53

СТАБИЛИЗАЦИЯ ПЛАМЕНИ НА МАССИВЕ ПРОТИВОТОЧНЫХ ЗАКРУЧЕННЫХ СТРУЙ

Одним из наиболее часто применяемых методов стабилизации пламени является использование высокоэнтальпийных струйных течений. Для повышения стабильности таких течений применяются закрутка потока [1] и организация противоточного движения [2]. Результаты исследований стабилизации пламени на одиночных закрученных и противоточных струях подтвердили эффективность такого подхода и позволили сформулировать критерии надежного запуска форсажных камер сгорания [3]. Дополнительное повышение стабильности закрученных течений возможно за счет использования массивов струй, вдуваемых в основной поток радиально или расположенных соосно с ним. Это также позволит увеличить объемную теплонапряженность зоны воспламенения и расширить диапазон параметров надежного запуска камер сгорания.

В работе проведены исследования, направленные на изучение стабилизации пламени в горелках с противоточными закрученными струями и массивов на их основе.

Для проведения исследования были смоделированы сверхзвуковые горелочные устройства, конструктивно представляющие собой цилиндрическую камеру $d=16$ мм с 3 тангенциальными поводами и обладающие различной длиной противоточной камеры $5\frac{l}{d}$, $6\frac{l}{d}$ и $7\frac{l}{d}$. Данные горелочные устройства образуют массив при закреплении в ряд на поверхности прямоугольной модельной камеры сгорания. Компоновка такого массива показана на рисунке 1. На рисунке 2 показана фотография экспериментальной модели противоточной горелки для стабилизации пламени.

Эксперимент проводился при значениях мощности одиночной противоточной горелки 20 кВт. В качестве топлива был использован метан, подаваемый по магистрали в сверхзвуковые горелочные устройства, а в качестве окислителя – воздух из компрессорной магистрали, подаваемый через трехходовый тангенциальный подвод. В основную камеру сгорания подавалась перемешанная топливоздушная смесь со значением коэффициента избытка воздуха $\alpha = 1$.

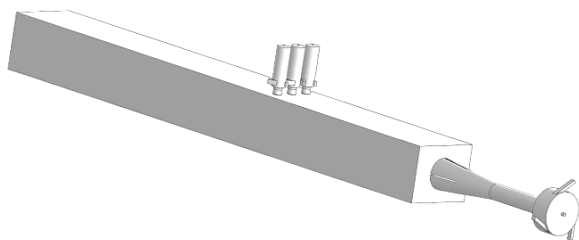


Рис.1 Компоновка массива в экспериментальной установке

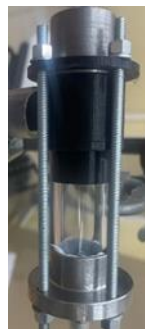


Рис.2 Экспериментальная модель горелки-стабилизатора

При воспламенении горения топливовоздушной смеси массивом сверхзвуковых противоточных закрученных струй внутри основной камеры сгорания происходит значительная перестройка поля течения, приводящее к образованию вторичных вихревых структур за точкой стабилизации. Кроме этого, в рамках исследования дополнительно рассмотрено влияние изменения длины противоточной камеры горелочного устройства на эффективность стабилизации горения массивом закрученных струй.

Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение фундаментальных научных исследований (шифр научной темы FSSG-2023-0002).

Список литературы

1. S. Taamallah, Z.A. LaBry, S. J. Shanbhogue, M. A. Habib, A. F. Ghoniem. "Correspondence Between "Stable" Flame Macrostructure and Thermo-Acoustic Instability in Premixed Swirl-Stabilized Turbulent Flame Combustion" // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 137, 2015.
2. Guryanov A.I. et al. Criterion analysis and experimental study of combustion mechanisms in a bidirectional swirling flow and their relationship with pollutants emission // Int J Energy Res. 2021. Vol. 45, № 4. P. 5500–5516.
3. J. Driscoll, J. Temme. "Role of swirl in flame stabilization", 2011

P.A. Kolganov¹, O.A. Evdokimov¹

¹P.A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University,
Russia 152934, Rybinsk, Pushkin St., 53

FLAME STABILIZATION IN A BIDIRECTIONAL SWIRLINGFLOWARRAY

О.С. Заводова¹, С.А. Сургучев¹, Р.И. Иванов¹

¹ Рыбинский государственный авиационный технический
университет имени П. А. Соловьева,
Россия, 152934, Рыбинск, , ул. Пушкина, 53

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОТИВОТОЧНОГО ЗАКРУЧЕННОГО ТЕЧЕНИЯ ДЛЯ СЖИГАНИЯ БЕЗУГЛЕРОДНОГО ТОПЛИВА

Закрученные потоки получили широкое распространение практически во всех отраслях промышленности. Их используют в процессах, сопровождающихся горением, тепломассообменом, химическими реакциями и т.д. Все это благодаря ряду уникальных свойств закрученных течений, основными из которых являются: формирование рециркуляционных зон и радиальных градиентов давления, температурная неравномерность потока по сечению, существенная интенсификация тепломассообменных процессов и др.

Применение закрученных течений с противотоком, имеет ряд преимуществ, относительно различных распространённых газодинамических схем подготовки ТВС, поэтому их широко используют в низкоэмиссионных камерах сгорания, работающих в том числе и на нетрадиционных видах топлива.

В последнее время одной из главных проблем в энергетике являются значительные выбросы парниковых газов, которые образуются при использовании углеводородного топлива, что приводит к повышению средней глобальной температуры на планете. Существующая на сегодня тенденция роста выбросов CO₂ грозит потенциальной экологической катастрофой, и ее решение возможно за счет скорейшего перехода к принципам углеродной нейтральности.

Для решения этой проблемы все чаще применяют безуглеродное топливо. Широкое распространение получило применение водорода в качестве экологического источника энергии, единственным продуктом сгорания которого является водяной пар. Однако, применение водорода существенно ограничено его высокой взрывоопасностью, сложностью хранения и транспортировки. Альтернативой может служить аммиак, который по сравнению с водородом имеет большую объемную плотность энергии, легко сжижается, безопасно хранится и транспортируется на дальние расстояния.

Основным недостатком аммиака являются повышенные требования к его воспламенению и поддержанию стабильного горения. Это связано с высокой температурой зажигания аммиака и низкой скоростью горения в воздушной среде, что требует разработки новых научных подходов к его экологически чистому сжиганию.

Перспективным направлением является сжигание аммиака с использованием противоточных закрученных течений, способных поддерживать стабильное горение.

Авторами разработано противоточное горелочное устройство и проведены исследования горения аммиака, определены срывные и эмиссионные характеристики, границы устойчивого горения, на различных режимах горения. Исследования проводились на одиночном противоточном горелочном устройстве.



Рис. 1. Исследование горения аммиака в противоточной вихревой горелке

Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение фундаментальных научных исследований (шифр научной темы FSSG-2023-0002).

Список литературы

1. Oleg Evdokimov; Danila Prokhorov; Alexander Guryanov; Sergey Veretennikov. Transient numerical simulations of a cold-flow bidirectional vortex chamber. Research Article| January 19 2022, Physics of Fluids, Volume 34, Issue 1. <https://doi.org/10.1063/5.0079224>

O.S. Zavodova¹, S.A. Surguchev¹, R.I. Ivanov¹

¹ P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University,
Russia 152934, Rybinsk, Pushkin St., 53

APPLICATION BIDIRECTIONAL SWIRLING FLOW FEATURES FOR CARBON-FREE FUEL COMBUSTION

Т.А. Федорова¹, Д.С. Пашкевич^{1,2}, П. А. Попов³

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

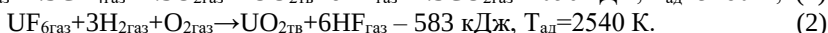
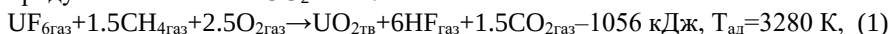
²ООО «Новые химические продукты», Россия, 191186, Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, 11А

³ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Россия, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕКОНВЕРСИИ ОБЕДНЕННОГО ГЕКСАФТОРИДА УРАНА В РЕЖИМЕ ГОРЕНИЯ

При изотопном обогащении природного урана в качестве побочного продукта образуется гексафторид урана, обеднённого по U-235 (ОГФУ), который является веществом первого класса опасности. Несмотря на почти вековую историю развития атомной промышленности, в России попытки создать коммерчески эффективную технологию реконверсии ОГФУ до сих не увенчались успехом, поэтому ОГФУ продолжают накапливать и хранить в стальных контейнерах на открытых площадках обогатительных предприятий. Объемы накопления ОГФУ каждый год в среднем увеличиваются на 50 тысяч тонн.

Одним из направлений современных исследований является взаимодействие ОГФУ с водородсодержащими веществами, в качестве которых могут выступать метан или водород, как одни из самых распространённых и коммерчески доступных горючих, и кислородом в режиме горения, когда температура в зоне реакции превышает 1150 К и термодинамически равновесными продуктами являются UO_2 и HF :



Применение (1–2) может не только позволить эффективно утилизировать ОГФУ, но и получить коммерчески значимые продукты – HF и оксиды ядерно-чистого урана, используемые при производстве МОКС-топлива.

Для масштабирования промышленного реактора типа «туннельная горелка» на основе метода подобия полей параметров (максимальная экспериментально полученная скорость потока, при которой не происходит срыв пламени, максимальная температура в зоне горения и др.) создана и верифицирована математическая модель диффузионного турбулентного горения. Модель основана на дифференциальных уравнениях движения, неразрывности, переноса кинетической энергии турбулентности, переноса удельной скорости диссипации кинетической энергии турбулентности, диффузии, переноса теплового излучения, энергии. Для расчета скорости химической реакции

использована модель дробления вихрей. Движущаяся сплошная среда считается несжимаемой – число Маха менее 0.5. Частицы оксидов урана, размер которых в опытах составил величину порядка 1 мкм, считают «вмороженными» в поток. Модель реализована в программном комплексе «ANSYS Fluent 2019 R3» [2].

Модель верифицирована путем сравнения рассчитанных полей температуры с результатами экспериментального измерения температуры в реакторе типа «туннельная горелка» диаметром 142 мм при проведении исследуемого процесса с расходом UF_6 3 г/с и подбора степени черноты частиц диоксида урана, которая составила 0.6 при удовлетворительном совпадении расчётных и экспериментальных значений температуры. По литературным данным степени черноты частиц UO_2 составляет 0.82. По результатам численного моделирования установлено, что максимальная температура в зоне реакции, когда состав продуктов близок к термодинамически равновесному при $T > 1150$ К, зависит от расхода компонентов, а ее среднее значение в экспериментах при изменении расхода ОГФУ от 1 до 6 г/с для реакции с метаном составляет 2180 К и 1890 К для реакции с водородом.

Максимальная скорость потока, достигнутая в экспериментах [1], при которой фронт пламени был стабилен, составила 49 и 119 м/с для CH_4 и H_2 соответственно. Среднее время пребывания ОГФУ в зоне реакции составляет порядка 20 мс для реакции с метаном и 3 мс для реакции с водородом.

Список литературы

1. Пашкевич Д. С., Зимин А. Р., Алексеев Ю. И., Мухортов Д. А., Камбур П. С., Петров В. Б., Баженов Д. А., Капустин В. В., Смолкин П. А., Федорова Т. А. Получение фторида водорода при взаимодействии гексафторида урана с метаном и кислородом в режиме горения // Инженерно-физический журнал. 2025. - Т. 98, №1. - С. 154–162
2. Федорова Т.А., Пашкевич Д.С., Попов П. А, Талалов В. А. Численное исследование влияния способа подачи реагентов в реактор на взаимодействие гексафторида урана с метаном и кислородом в режиме горения // Инженерно-физический журнал. 2025. - Т. 98, №1. – С. 145-153

T. A. Fedorova ¹, D. S. Pashkevich ^{1,2}, P. A. Popov ³

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Russia, 195251, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29

²New Chemical Products LLC,
Russia, 191186, Saint-Petersburg, Moyka River Embankment, 11A

³Ioffe Institute, Russia, 194021, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya St., 26,

NUMERICAL RESEARCH OF DEPLETED URANIUM HEXAFLUORIDE RECONVERSION PROCESS IN THE COMBUSTION MODE

ОСОБЕННОСТИ ВНУТРИКАМЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ ДВУХЗОННОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ МАЛОРАЗМЕРНОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Основным вопросом настоящей работы является обоснование эффективности применения двухзонной схемы подвода топлива в камере сгорания малоразмерного газотурбинного двигателя (МГТД). Большое количество работ посвящено исследованию двухзонных камер сгорания на полномасштабных двигателях, результаты которых показали значительный положительный эффект при использовании камер такого типа, например, повышение полноты сгорания топлива [1]. Двухзонная камера сгорания предполагает разделение процесса горения на две зоны: первичная зона горения, где происходит подвод топливо-воздушной смеси, ее воспламенение и поддержание устойчивого горения и зона догорания, где завершается процесс горения и обеспечивается требуемое равномерное температурное поле на выходе из камеры сгорания.

В малоразмерных двигателях затруднительно обеспечить устойчивое горение из-за ограниченных размеров жаровой трубы и высоких скоростей потока. Двухзонная схема позволяет:

- 1) стабилизировать процесс горения, организовать две стехиометрические зоны и увеличить полноту сгорания топлива.
- 2) оптимизировать процесс сжигания топлива, что приводит к снижению выбросов CO, NO_x и несгоревших углеводородов.
- 3) обеспечить равномерное распределение температуры на выходе из камеры сгорания для защиты соплового аппарата турбины.

Камеры сгорания МГТД являются высоконагруженным узлом двигателя. Высокие тепловые нагрузки могут привести к перегреву элементов камеры сгорания, что требует применения термостойких материалов и эффективного охлаждения. Разделение потока на две зоны может увеличить гидравлические потери, что осложняет процесс доводки камеры сгорания. Развитие численных комплексов позволяет сократить процесс доводки перед проведением экспериментальных работ с приемлемыми затратами компьютерного времени. Использование CFD-моделирования для исследования двухзонной камеры сгорания и анализа внутрикамерных процессов позволяет провести

^(*) Р.Р. Халиулин, steel-toreto@mail.ru

оценку преимуществ и недостатков двухзонной схемы по сравнению с традиционной однозонной камерой сгорания. Одной из задач исследования является необходимость настройки численной модели для учёта особенностей конструкции и режима работы камеры сгорания.

Исследуемая расчетная модель четверти сектора кольцевой камеры сгорания представлена на рисунке 1.

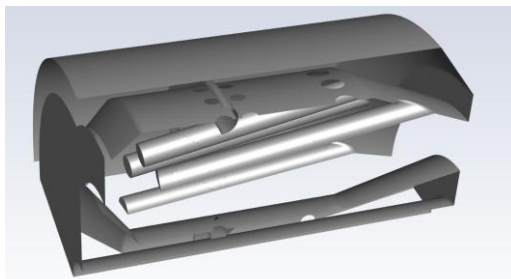


Рис. 1. Твердотельная модель четверти камеры сгорания

Модель состоит из 3,28 млн. ячеек. Размер тетраэдральных ячеек варьируется от 0,2 мм до 1 мм. Расчет проводился в стационарной постановке для основного режима работы двигателя. с качеством по скошенности не более 0,87. Упрощением в сеточной модели являлось отсутствие сеток в стенках жаровой трубы.

Оценка эффективности двухзонного подвода топлива в первичную зону и в зону догорания сравнивалась с традиционным подводом топлива в первичную зону горения по количеству оставшейся массовой доли керосина на выходе камеры сгорания. Двухзонный подвод топлива позволил снизить количество несгоревшего керосина в три раза.

Список литературы

1. Khaliulin R. Experimental investigation of two-zone dry low emission gas turbine combustor / Khaliulin R., Yousef W., Sychenkov V., Davydov N., Varsegov V. // Procedia Environmental Science, Engineering and Management. – 2021. Т. 8. № 1. – pp. 275-281.

R.R. Khaliulin, V.A. Sychenkov, S.A. Yusupova

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

INTERNAL PROCESSES OF THE TWO-ZONE COMBUSTOR IN THE SMALL-SIZED GAS TURBINE ENGINE

Я.В. Тропин^{1,2}, С.А. Рашковский²

¹ ОКБ им. А. Люльки – филиал ПАО «ОДК-УМПО»,
Россия, 129301, Москва, ул. Касаткина, 13

² Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН
Россия, 119526, Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУР В КОЛЬЦЕВОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВУХКОНТУРНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФОРСАЖНОЙ КАМЕРОЙ (ТРДДФ)

Для моделирования сложных физико-химических процессов, протекающих в камере сгорания, требуются комплексные математические модели, содержащие большое количество параметров, неподдающихся прямому численному расчёту.

В данной работе представлена численная модель, выполненная в программном комплексе STAR-CCM+, и сопоставлены результаты экспериментальных данных. Поле температур (рисунок 1), полученное экспериментально, имеет периодическую особенность на выходе из жаровой трубы [1]. Эта особенность исследуемой камеры сгорания проявляется в отсутствии ожидаемых индивидуальных температурных максимумов и их попарном объединении на выходе из жаровой трубы.

Целью данной работы является моделирование температурных максимумов на выходе из жаровой трубы и выявление причин их образования.

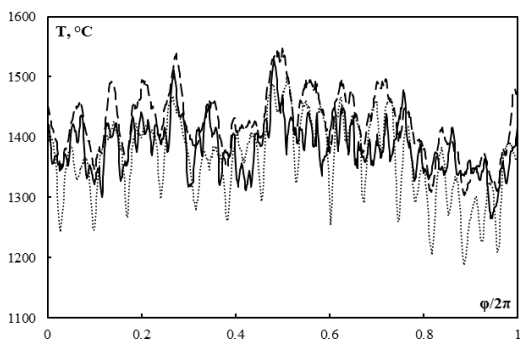


Рис. 1. Поле температур на выходе из камеры сгорания

Список литературы

1. Тропин Я.В., Рашковский С.А. Особенности температурных полей в камере сгорания газотурбинного двигателя // Горение и взрыв, 2024. Т. 17. № 2. С. 25-34. doi: 10.30826/CE24170204

***Ya.V.Tropin*^{1,2}, *S. A. Rashkovskiy*²**

¹ Lyulka Experimental Design Bureau, branch of the United Engine Corporation – Ufa
Engine Industrial Association

Russia, 129301, Moscow, Kasatkina St., 13

² Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS
Russia, 119526, Moscow, av. Vernadskogo, n. 101, b. 1

**NUMERICAL MODELING OF TEMPERATURE FIELDS IN THE
ANNULAR COMBUSTION CHAMBER OF A TURBOJET BYPASS
ENGINE WITH AFTERBURNER**

ГАЗОДИНАМИКА И ГОРЕНИЕ В МАССИВАХ ПРОТИВОТОЧНЫХ ЗАКРУЧЕННЫХ СТРУЙ

В современном мире наблюдается тенденция к развитию водородной энергетики, и многие крупные игроки на рынке уже разработали собственные программы по использованию водорода в качестве топлива. Водород является одним из самых экологически чистых видов топлива, поскольку при его сгорании не образуется никаких вредных веществ, кроме водяного пара. Однако, несмотря на все преимущества, существует ряд проблем, которые затрудняют повсеместный переход к водородной энергетике. Основными из них являются: взрывоопасность водорода; низкая плотность энергии в его объёме; сложность хранения и транспортировки в сжиженном виде.

Аммиак, который ранее применялся в основном в сельском хозяйстве, химической промышленности и медицине, представляет собой альтернативу водороду как безуглеродное топливо. Его использование может быть как в качестве формы хранения водорода, так и в качестве самостоятельного вида топлива, что делает его более привлекательным с энергетической точки зрения. Ежегодное производство аммиака в мире составляет около 175 миллионов тонн, и, по прогнозам, до 2050 года его объёмы будут увеличиваться на 60-70%. Лидирующими производителями аммиака являются Китай (26,6%), Россия (10,9%) и США (9,6%).

Ключевыми проблемами использования аммиака в качестве топлива являются его высокая температура воспламенения (650°C) и низкая скорость горения в воздухе (~6 см/с).

Перспективной технологией организации горения является структуризация течения в виде массивов различной размерности, основу которых составляют элементарные реагирующие струи. В таких течениях имеет место целый комплекс теплофизических процессов, включающий формирование крупной и мелкомасштабной турбулентности, наличие ламинарно-турбулентных переходов, отрывные явления в присутствии химических и фазовых превращений.

Наиболее актуальным вопросом организации массивов реагирующих струй является вопрос концептуального выбора схемы течения и механизма горения в отдельных элементах системы. Организация горения в противоточном закрученном течении соответствует большинству из требований,

предъявляемых к перспективным концепциям сжигания топлива, в том числе аммиака.

Создана уникальная технология, основанная на схеме воспламенения и горения аммиака в противоточном закрученном воздушном течении. Она продемонстрировала высокую эффективность при организации сжигания чистого водорода и низкоуглеродных видов топлива на основе различных метано-водородных композиций. Показана возможность масштабирования созданной технологии при создании многофорсуночных камер сгорания двигателей большой мощности.

В работе реализованы такие способы изучения структуры реагирующих противоточных закрученных течений, как экспериментальное исследование бесконтактными оптическими методами, в частности PIV и высокоскоростной визуализацией. Это позволило получить новые результаты и знания об особенностях нестационарной турбулентной структуры и механизмах горения в массивах противоточных закрученных течений (рис. 1 и 2).



Рис. 1. Смешанный массив противоточных струе на основе метана и аммиака



Рис. 2. Воспламенение аммиака в массиве противоточных струй

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 25-49-00233).

Список литературы

1. An experimental study of the flow structure in arrays of cold bidirectional swirling jets / O.A. Evdokimov, A.I. Gutyayov, S.V. Veretennikov // *Physics of Fluids*, 2024. Vol. 36(4). P. 045115.
2. Guryanov A.I. et al. Criterion analysis and experimental study of combustion mechanisms in a bidirectional swirling flow and their relationship with pollutants emission // *Int J Energy Res*. 2021. Vol. 45, № 4. P. 5500–5516.

O. A. Evdokimov^{1,2}

¹Soloviev Rybinsk State Aviation Technical University,
Russia 152934, Rybinsk, Pushkin St., 53

²Kutateladze Institute of Thermophysics,
Russia 630090, Novosibirsk, Lavrentyev Avenue, 1

FLOW DYNAMICS AND COMBUSTION IN ARRAYS OF BIDIRECTIONAL SWIRLING JETS

СЕКЦИЯ 4

Радиационный, сложный и
сопряженный теплообмен, в том числе
дисперсные потоки и пористые среды

А.А. Мошин^{1,2}, Д.П. Храмцов¹, Н.С. Захаров¹, Д.А. Некрасов^{1,2},

И.А. Михайлова³

¹ МИРЭА – Российский технологический университет,
Россия, 119454, Москва, пр. Вернадского, д. 78

² Московский политехнический университет,
Россия, 107023, Москва, ул. Большая Семеновская, д. 38

³ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Россия, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООБМЕНА В ГИДРОГЕЛЯХ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ГРАФЕНОМ И НАНОАЛМАЗАМИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ТЕХНОЛОГИЯМ 3D-БИОПЕЧАТИ

В последние годы растет интерес по созданию биочернил с добавлением различных компонентов для технологий 3D-биопечати, которые способны существенно изменять свойства гидрогелей даже в незначительных концентрациях. Одним из таких материалов является графен [1]. Несмотря на растущее количество исследований, остаются существенные пробелы в методах изучения свойств таких материалов и других композитов, модифицированных компонентами на основе графена. В частности, влияние различных размеров и типов частиц, концентраций графеновых модификаторов на свойства таких материалов изучено недостаточно.

Помимо графена, перспективными модификаторами гидрогелей являются наноалмазы. Эти частицы обладают рядом уникальных свойств, которые делают их привлекательными для биомедицинских приложений. В частности, синтезированные методом гидродинамической кавитации наноалмазы имеют высокую химическую чистоту, сферическую форму, высокую монодисперсность (размер 1-3 нм.) и седиментационную устойчивость в коллоидных системах. Они демонстрируют исключительную теплопроводность, биосовместимость и возможность химической модификации поверхностных функциональных групп, что делает их потенциально полезными для регулирования реологических и механических свойств гидрогелей в 3D-биопечати.

С помощью ранее описанного метода голографической интерферометрии в сочетании с градиентной теплотометрией [2] изучено возникновение конвективных течений в гидрогелях, модифицированных графеном и наноалмазами, при фазовых переходах. На рис. 1(1) приведены видеок кадры момента начала возникновения конвекции в чистом желатиновом гидрогеле при наличии графена рис. 1(3) и наноалмазов рис. 1(2).

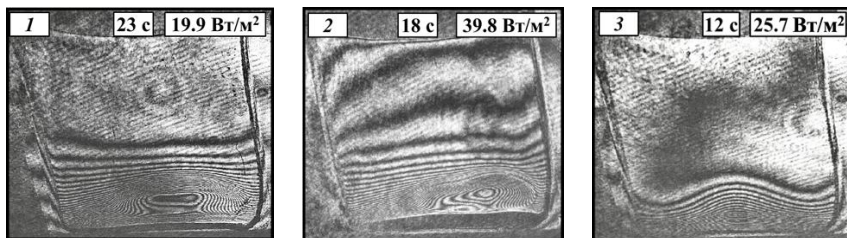


Рис. 1. Видеокадры начала возникновения конвекции для различных образцов гидрогелей при $N = 3.5\text{Вт}$: 1 – желатиновый гель 4.0% масс., 2 – желатиновый гель 4.0% масс. + наноалмазы 0.1% масс., 3 – желатиновый гель 4.0% масс. + графен 0.1% масс.

Установлено, что наличие модифицирующих компонентов, присутствующие даже в столь незначительных концентрациях оказывают существенное влияние на их теплофизические свойства.

Исследования показали, что наноалмазы могут влиять на теплообмен гидрогелей. Таким образом, использование наноалмазов открывает новые перспективы для разработки биочернил с улучшенными характеристиками и функциональностью.

Список литературы

1. Pokusaev B., Moshin A., Nekrasov D., Khramtsov D., Zakharov N., Khairov R. Heat transfer in inhomogeneous dispersed systems based on graphene oxide hydrogels // Thermal Science. – 2024, - Vol. 28, No. 6A. - P. 4579–4588.
2. Захаров Н.С., Покусаев Б.Г., Вязьмин А.В., Некрасов Д.А., Сулягина О.А., Мошин А.А. Исследование процессов теплопереноса в гидрогелях методами голографической интерферометрии и градиентной теплотометрии // Письма в Журнал технической физики. – 2022. - Т. 48, No. 9. - С. 10-14.

A.A. Moshin^{1,2}, D.P. Khramtsov¹, N.S. Zakharov¹, D.A. Nekrasov^{1,2},

I.A. Mikhailova³

¹ MIREA - Russian Technological University,
Russia, 119454 Moscow, pr. Verdanskogo, 78

² Moscow Polytechnic University,
Russia 107023 Moscow, st. Bolshaya Semenovskaya, 38

³ National Research University «MPEI»,
Russia 111250 Moscow, st. Krasnokazarmennaya, 14

CHARACTERISTICS OF HEAT TRANSFER IN HYDROGELS MODIFIED WITH GRAPHENE AND NANODIAMONDS FOR 3D BIOPRINTING APPLICATIONS

РАДИАЦИОННОЕ ОСТЫВАНИЕ НЕМОНОДИСПЕРСНОГО КАПЕЛЬНОГО ПОТОКА В БЕСКАРКАСНЫХ СИСТЕМАХ ОТВОДА НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОГО ТЕПЛА В КОСМОСЕ

Решение ряда задач, связанных с использованием космического пространства, требует качественного повышения мощности энергетических установок космических аппаратов. При создании таких систем возникает задача отведения низкопотенциального тепла. Как правило, в космосе она решается с помощью панельных холодильников – излучателей. Однако при повышении отводимой мощности быстро растет площадь, а с ней - и метеоритная уязвимость таких систем. Бронирование поверхности излучателя неприемлемо повышает массу конструкции. Выходом представляется использование капельного холодильника – излучателя (КХИ), идея которого заключается в радиационном остывании распространяющегося дисперсного потока. Создание капельной пелены осуществляется с помощью генератора капель, сбор остывшего потока – уловителем капель.

Применительно к созданию КХИ ранее был проведен ряд исследований процессов генерации капель, их остывания, сбора остывших частиц в условиях микрогравитации и глубокого вакуума, электризации капельной пелены, синтеза жидких теплоносителей для КХИ, обладающих низким давлением насыщенных паров и т.д. Однако зачастую исследования различных процессов проводились разными исследовательскими группами независимо друг от друга при качественно различных значениях рабочих параметров КХИ. Актуальной научной задачей является разработка комплексной теории происходящих в КХИ процессов. Ее создание позволит оптимальным образом организовать протекание различных процессов в КХИ и разработать обоснованные взаимообусловленные технические требования к различным узлам КХИ. В данной работе производится совместный анализ процессов генерации капельного потока и его радиационного остывания. Целью исследования является определение допустимой величины степени немонодисперсности капельного потока КХИ с точки зрения организации процесса остывания капель.

Проведено моделирование радиационного остывания немонодисперсного капельного потока в бескаркасных системах отвода низкопотенциального тепла в космосе. Показано, что в случае, когда немонодисперсность выражается в небольшом отклонении радиусов капель от средней величины, флук-

туации поля температуры в потоке, определяемые немонодисперсностью, по амплитуде не превышают разницы температуры капель, находящихся на периферии и в ядре потока. При этом влияние немонодисперсности потока на его среднемассовую температуру оказывается малой величиной.

В случае, если в капельном потоке присутствуют сателлитные капли, радиус которых в 5-10 раз меньше размера основных капель, флуктуации поля температуры могут достигать нескольких десятков градусов. Для того, чтобы сделать вывод о возможности или невозможности использования таких дисперсных потоков в КХИ необходимо провести дополнительные исследования закономерностей улавливания холодных капель теплоносителя пленкой нагретой жидкости на поверхности уловителя капель, а также влияния сателлитов на угловое отклонение траекторий частиц в потоке. Микросателлитные капли, размер которых может составлять несколько микрометров, представляют опасность для штатной работы КХИ. Из-за малого размера их эффективная степень черноты оказывается низкой, что приводит к их слабому радиационному взаимодействию с дисперсным потоком и быстрому охлаждению из-за малого размера. Расчеты показывают, что микросателлиты могут охлаждаться до температуры порядка 200 К. Необходимо проведение комплексных расчетно-экспериментальных исследований процесса взаимодействия таких капель с пленкой нагретой жидкости на поверхности уловителя капель.

A.A. Safronov, A.A. Koroteev, N.I. Filatov

JSC GNC "Center Keldysha",
Russia, 152934, Moscow, ul. Onezhskaya,

RADIATION COOLING OF NON-MONODISPERSED DROPLET FLOW IN FRAMELESS SYSTEMS FOR LOW-POTENTIAL HEAT REMOVAL IN SPACE

*Д.А. Павлов, В.С. Захаров, А.Ф. Алибаев, С.Ю. Нечипорук*¹

¹ Федеральное автономное учреждение
«Центральный Институт Авиационного Моторостроения имени П.И. Баранова»,
Россия, 111116, Москва, ул. Авиамоторная, 2

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СОПРЯЖЕНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПРОГРЕВА СТЕНОК ГАЗОВОГО КАНАЛА ПРИ ПСЕВДОСКАЧКОВОМ ТИПЕ ТЕЧЕНИЯ

Моделирование теплового состояния при течении с псевдоскачком целесообразно проводить с использованием нестационарной сопряжённой постановки, в которой рассчитывается как движение газовой фазы, так и процесс теплопередачи в твёрдом теле. Основная проблема при проведении таких расчетов возникает из-за значительной разницы во временных масштабах протекающих процессов. Общее время длительности прогрева конструкции может составлять $10^1 \dots 10^3$ с, а характерный временной шаг в задачах газовой динамики сжимаемых сред не превышает 10^{-6} с [1]. Использование слабого сопряжения позволяет существенно сократить расчетные и временные ресурсы, затрачиваемых на моделирование.

Методы моделирования сопряженного теплообмена различаются по связи решателей для газовой и твердотельных областей. Чаще всего применяется слабое и строгое сопряжение. В случае строгого сопряжения используется решатель с единым временным шагом. Сопряжение на границе осуществляется передачей температуры поверхности твердого тела в качестве условия Дирихле для газовой области, а для моделирования теплообмена в твердом теле используется тепловой поток в качестве условия Неймана. При слабом сопряжении задачи течения газа в канале и прогрева конструкции решаются независимо и с соответствующими характерными шагами по времени. Обмен условиями на границе происходит через заданный интервал. В таком случае допустимо, что на каждом временном отрезке для моделирования теплового состояния конструкции (не больше $10^{-1} \dots 10^{-3}$ с) задача газовой динамики будет считаться до установления стационарного решения [2].

В данной работе приведена оценка параметров слабого сопряжения для задачи нестационарного прогрева стенки при течении с псевдоскачком, которые соответствуют наименьшему времени моделирования при минимальном отклонении от решения с использованием строгого сопряжения.

Список литературы

1. Voigt, S., Noll, B., & Aigner, M. (2019). Development of a model for unsteady conjugate heat transfer simulations. Progress in Computational Fluid Dynamics, An International Journal, 19(2), 69.
2. Özgen, S. (2004). Effect of heat transfer on stability and transition characteristics of boundary-layers. International Journal of Heat and Mass Transfer, 47(22), 4697–4712.

D.A. Pavlov¹, V.S. Zakharov¹, S.Iu. Nechiporuk¹, A.F. Alibaev¹

¹ Federal autonomous institution

«Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov»,
Russia, 111116, Moscow, Aviamotornaya str., 2

STUDY OF COUPLING PARAMETRIZATION FOR UNSTEADY STRUCTURE HEATING BY SHOCK TRAIN MOTIONS

И.А. Заграй¹, В.А. Кузьмин¹, А.С. Лоншаков²

¹Вятский государственный университет,
Россия, 610000, Киров, ул. Московская, 36

²Кировский филиал ПАО «Т Плюс»
Россия, 610044, Киров, ул. Луганская, 51

ОПЫТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ЧАСТИЦ КОНДЕНСИРОВАННОЙ ФАЗЫ ПРИ ФАКЕЛЬНОМ СЖИГАНИИ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ

Рабочие среды различных энергетических установок в общем случае состоят из компонентов газовой фазы и частиц конденсированной фазы разного химического состава. Измерение температуры газовой фазы паровых котлов при сжигании твердых топлив (торфа и угля) является необходимым для контроля образования NO_x [1, 2]. Определение температуры конденсированной фазы позволяет прогнозировать плавление минеральной части топлива [3], минимизировать или предотвращать процесс шлакования топки.

В работе проведены пирометрические исследования температуры конденсированной фазы в паровом котле БКЗ-210-140Ф при факельном сжигании торфа Кировской области и кузнецкого угля. Конденсированная фаза представляла собой дисперсную систему частиц кокса и золы сложного химического состава

Измерения проводились с помощью пирометра Raynger R3I 2MSC в окне прозрачности газовой фазы ($\lambda = 1,6$ мкм) на разных высотах топки: $H = 9$ м (уровень горелок), 14 м (центральная часть факела) и 16 м (хвостовая часть факела). С изменением излучательной способности ϵ_λ ($\Delta\epsilon_\lambda = 0,1$) фиксировались температуры, регистрируемые пирометром. Определены спектральные плотности потоков энергии излучения F_λ , воспринимаемые пирометром, а также значения яркостных температур T_λ для соответствующих высот. Истинная температура частиц может быть определена по формуле:

$$1/T = 1/T_\lambda + \lambda \cdot C_2^{-1} \cdot \ln[\epsilon_\lambda + (1 - \epsilon_\lambda) \cdot \exp(-C_2 \cdot \lambda^{-1} \cdot T_\lambda^{-1})].$$

Для теоретического определения ϵ_λ конденсированной фазы использовалась разработанная нами программа «Spektr» [4], которая основана на решении уравнения переноса энергии излучения методом сферических гармоник в P_3 -приближении для многокомпонентной излучающей, поглощающей и рассеивающей среды. При определении содержания (массовой доли, концентрации) компонентов конденсированной фазы учитывались зависимости степени выгорания топлива $\beta^{\text{ст}}$ по высоте топки.

Пересечения экспериментальной $\varepsilon_\lambda = f(T_{\text{эксп}})$ и расчетной $\varepsilon_\lambda = f(T_{\text{теор}})$ функций (рис. 1) позволили найти значения ε_λ и истинные температуры частиц конденсированной фазы, которые составили 1453 К (9 м, $\varepsilon_\lambda = 0,496$), 1228 К (14 м, $\varepsilon_\lambda = 0,349$) и 1334 К (16 м, $\varepsilon_\lambda = 0,238$) при сжигании торфа и 1484 К (9 м, $\varepsilon_\lambda = 0,89$), 1637 К (14 м, $\varepsilon_\lambda = 0,767$) и 1445 К (16 м, $\varepsilon_\lambda = 0,762$) при сжигании угля.

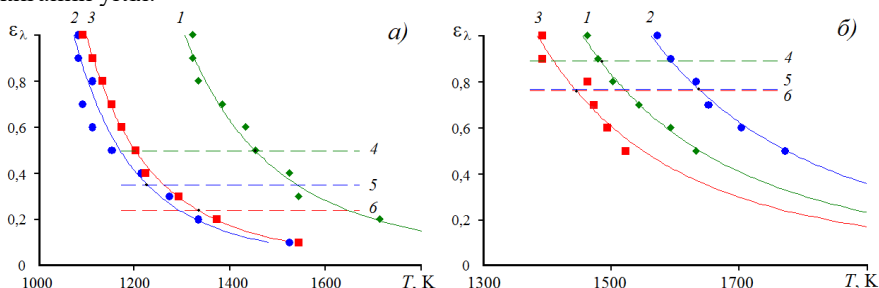


Рис. 1. Зависимости спектральной излучательной способности от температуры при сжигании торфа (а) и угля (б): 1, 2, 3 – Экспериментальные функции $\varepsilon_\lambda = f(T_{\text{эксп}})$; 4, 5, 6 – Расчетные функции $\varepsilon_\lambda = f(T_{\text{теор}})$. $H = 9$ м (1, 4), 14 м (2, 5), 16 м (3, 6)

Список литературы

1. Кузьмин В.А., Заграй И.А., Шмакова Н.А. Определение температуры и излучательной способности топочных газов парового котла при факельном сжигании торфа // Теплоэнергетика. 2023. № 1. С. 66-74.
2. Кузьмин В.А., Заграй И.А., Десятков И.А. Контроль образования оксидов азота в топке парового котла с целью защиты атмосферного воздуха от загрязнения // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 3. С. 126-132.
3. Кузьмин В.А., Заграй И.А., Десятков И.А. Определение плавкости золы торфа месторождений Кировской области // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 11-12. С. 27-33.
4. Кузьмин В.А., Заграй И.А., Десятков И.А. Исследование характеристик излучения и температуры топочных газов парового котла БКЗ-210-140Ф при факельном сжигании фрезерного торфа с подсветкой природным газом // Теплофизика и аэромеханика. 2021. Т. 28. № 2. С. 303-313.

I.A. Zagrai¹, V.A. Kuzmin¹, A.S. Lonshakov²

¹Vyatka State University,
Russia, 610000, Kirov, Moscovskaya, 36

²PJSC «T Plus» Kirov
Russia, 610044, Kirov, Luganskaya, 51

**EXPERIMENTAL AND THEORETICAL DETERMINING OF
TEMPERATURE AND EMISSIVITY OF CONDENSED PHASE
PARTICLES DURING FLAME COMBUSTION OF SOLID FUELS**

РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ СОЛНЕЧНОГО ИСПАРИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ГРАФЕНОВЫХ ХЛОПЬЕВ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПАРЕНИЯ И ОПРЕСНЕНИЯ

Полученные результаты исследования взаимодействия графеновых хлопьев с электромагнитным излучением показали их высокую поглощательную способность в широком диапазоне длин волн [1], поэтому были поставлены задачи подготовки графеновых структур и поверхностей на их основе для эффективного солнечного испарения с целью получения чистой или обессоленной воды. Следует отметить, что в этой области большинство исследователей уделяло основное внимание созданию сложных пористых структур с включением в них наночастиц. Однако необходимо понимать, что интенсивность испарения будет определяться температурой и структурой поверхностей испарения, параметрами окружающей среды (температурой и влажностью воздуха) и механизмом отвода испаряющейся воды от поверхности. Во многих исследованиях процессов испарения с поверхности пористых структур (естественно пористые структуры, гидро и аэрогели с включением наночастиц и др.) при облучении структуры поглощение излучения и образование пара происходит преимущественно в объеме структуры, что вызывает трудности отвода пара из пор. Поэтому эффективность испарения в таких конструкциях оказывалась не высокой. Цель настоящего исследования состояла в разработке конструкции испарителя, которая поглощает всю падающую солнечную энергию и быстро выходит на стационарный режим нагрева, чтобы при дальнейшем ее облучении вся поглощенная энергия тратилась на процесс парообразования. Разработаны структуры испарителя на основе двух- и трехмерных каналов подпитки воды к зоне испарения. Показано, что испаритель на основе двухмерных водяных каналов быстро достигает стационарного режима нагрева, что приводит к высокой скорости выработки пара (не менее $1.5 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ при одном солнце) в технологии прямой солнечной выработки пара. Оптимизированная структура испарителя вырабатывает пар со скоростью примерно $2 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ при одном солнце (рис. 1). В эксперименте использован солнечный имитатор модели TOP-X300 (компания ООО TOPTION).

(*) К.Т. Чан, tranqth.96@gmail.com

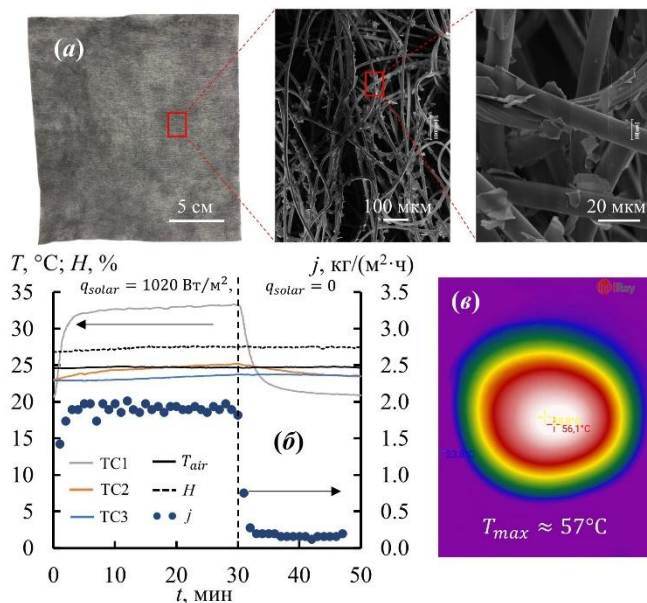


Рис. 1. Материал (а), производительность и температурные характеристики солнечного испарителя (б, в).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 23-19-00840).

Список литературы

1. Q.T. Tran, I.A. Mikhailova, V.V. Mikhailov, P.G. Makarov. Influence of the spectral composition of solar radiation on the heating and evaporation processes of graphene nanofluids // Solar Energy 282 (2024) 112977. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112977>

Q.T. Tran, I.A. Mikhailova

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

DEVELOPMENT AND OPTIMIZATION OF THE DESIGN OF A SOLAR EVAPORATOR BASED ON GRAPHENE FLAKES FOR EFFICIENT EVAPORATION AND DESALINATION

СЕКЦИЯ 5
Интенсификация процессов тепло- и
массообмена

А.Ф. Алибаев¹, В.С. Захаров¹, С.Ю. Нечипорук¹, Д.А. Павлов¹

¹ Федеральное автономное учреждение
«Центральный Институт Авиационного Моторостроения имени П.И. Баранова»,
Россия, 111116, Москва, ул. Авиамоторная, 2

НЕЙРОСЕТЕВАЯ СУРРОГАТНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В КАНАЛЕ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Успешность проектирования технических устройств в значительной мере определяется тщательностью анализа разрабатываемого изделия при изменении параметров его конструкции. Подобный анализ обычно ведется методами численного моделирования и является ресурсоемким. В литературе известен подход, в котором используется аппроксимация детальной модели при помощи более простого алгоритма, называемый суррогатным моделированием [1].

Суррогатное моделирование – это один из методов машинного обучения, в котором строится подменная (или суррогатная) модель для оценки результатов работы численного моделирования. Обученная статистическая модель в дальнейшем может применяться вместо исходной при проведении анализа чувствительности параметров и оптимизации их значений. В работе предлагается суррогатная модель, построенная на процессе конвективного теплообмена в канале трубы с накаткой, экспериментально рассмотренного в работе [2].

Ядром предложенной модели является нейронная сеть прямого распространения, обученная на результатах численного моделирования. В качестве входных значений используются геометрические параметры канала, число Рейнольдса и число Прандтля. Выходными параметрами модели являются число Нуссельта и коэффициент сопротивления.

Обучение сети велось на наборе данных, полученных при обработке результатов решения задачи сопряженного теплообмена для течения в трубе с накаткой различной формы, описываемой при помощи параметрической кривой Безье. Расчеты велись для воды, воздуха и гелия при различных условиях, определяемых величинами критериев подобия. Построение модели велось итеративно: набор обучающих примеров расширялся по необходимости до достижения сходимости по точности предсказаний нейронной сети на данных, не используемых при обучении.

Описанный подход позволяет на порядки сократить время, затрачиваемое на расчет характеристик процесса, и может быть использован при проектировании более сложных теплообменных устройств.

Список литературы

1. Петров М.Н., Зимина С.В. Суррогатная нейросетевая модель для восстановления поля течения в серийных расчетах стационарных турбулентных течений с разрешением пристеночной области // Компьютерные исследования и моделирование, 2024, т. 16, № 5, с. 1195-1216.
2. Калинин Э.К., Ярхо С.А. Влияние чисел Рейнольдса и Прандтля на эффективность интенсификации теплоотдачи в трубах // Инженерно-физический журнал, 1966, т. 11, № 4, с. 426-431.

A.F. Alibaev¹, V.S. Zakharov¹, S.Iu Nechiporuk¹, D.A. Pavlov¹

¹ Federal autonomous institution

«Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov»,
Russia, 111116, Moscow, Aviamotornaya str., 2

NEURAL NETWORK BASED SURROGATE MODEL OF CONVECTIVE HEAT TRANSFER IN DUCT WITH COMPLEX SHAPE

¹О.О.Мильман, ¹А.В.Птахин, ¹В.Б.Перов, ²В.В.Кудинов, ¹В.С.Крылов, ¹А.П. Железнов.

¹ЗАО «НПВП «Турбокон», Россия, 248010, Калуга, Комсомольская роща 43

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ АВАРИЙНОГО РАСХОЛАЖИВАНИЯ АТОМНОГО РЕАКТОРА

Системы аварийного расхолаживания (САР) реакторов являются важнейшим компонентом систем безопасности атомных электростанций. Главными задачами САР являются: отвод тепла от активной зоны реактора; предотвращение перегрева и повреждения оболочек ТВЭЛов; предотвращение превышения допустимого давления в контуре; устранение последствий нарушения циркуляции охлаждающей жидкости.

В ЗАО НПВП «Турбокон» спроектирован и изготовлен макет секции САР атомного реактора, на котором проведены экспериментальные исследования процессов теплопередачи от теплоносителя к воздуху при различных тепловых нагрузках.

1. Описание стенда

В качестве рабочего тела в замкнутом контуре используется аммиак. Движение рабочего тела в контуре осуществляется за счет естественной циркуляции.

Схема экспериментального стенда САР представлена на рисунке 1. Водяной пар отдает тепло аммиаку в контур САР в макете конденсатора 2, конденсат поступает в охладитель 3. Жидкий аммиак контура САР кипит в макете конденсатора САР. Пары аммиака поступают в макет модуля теплообменника-радиатора 1, где конденсируются и передают тепло окружающему воздуху. Запуск и останов стенда осуществляется исключительно за счет подвода и отвода тепловой нагрузки, так как аммиачный контур САР не имеет подвижных механизмов и полностью автономен, что является одним из главных преимуществ данной системы.

2. Результаты исследований

Выполнены экспериментальные исследования на стенде при различной тепловой нагрузке. Эксперименты проводились в два этапа: без установки и с установкой конвективной шахты над макетом теплообменника-радиатора. Проведен сравнительный анализ полученных данных.

Получен коэффициент теплопередачи от оребренной поверхности теплообменника-радиатора к воздуху $K = 0,232 - 0,63 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ и коэффициент теплопередачи от пара к аммиаку в макете конденсатора САР $K = 203,9 - 1912 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ при тепловой нагрузке в диапазоне от 1,05 до 4,85 кВт.

The diagram illustrates a refrigeration cycle with two heat exchangers. The cycle components and flow are as follows:

- Compressor (1):** Located at the top left, it compresses the refrigerant. The outlet temperature is labeled $t_{\text{вых}}$.
- Condenser (2):** A coil heat exchanger on the right. It rejects heat to the surroundings. The refrigerant exits at temperature $t_{\text{вых}}$ and pressure $P_{\text{вых}}$. It is cooled by water vapor (пар H_2O) and condenses water vapor (конденсат H_2O).
- Expansion Valve (3):** A vertical valve at the bottom right that reduces the pressure of the refrigerant.
- Evaporator (4):** A coil heat exchanger at the bottom left that absorbs heat from the space being cooled. The refrigerant exits at temperature $t_{\text{вых}}$.

The refrigerant is ammonia (NH_3). The cycle is represented by a solid blue line, and the cooling medium (water vapor) is represented by a dashed blue line.

1 – макет модуля теплообменника-радиатора САР; 2 – конденсатор; 3 – баллон с аммиаком; 4 – электронагреватель трубопровода

1. Теплогидравлические автоколебания и неустойчивость в теплообменных системах с двухфазным потоком / В.А.Федоров, О.О.Мильман. - М. : Изд-во МЭИ, 1998. - 236 с.
2. Машиностроение ядерной техники. Том iv-25 : в 2 книгах / с. О.адамов, ю. Г. Драгунов, в. В. Орлов, л. П. Абагян. — москва :машиностроение, [б. Г.]. — книга 1 — 2005. — 960 с.

²AO NIKIET, Russia, 107140, Moscow, Krasnoselsky okrug, pl. Ak. Dolezhalya, d.1, k.3

EXPERIMENTAL STUDY OF THE CHARACTERISTICS OF THE EMERGENCY COOLING SYSTEM OF A NUCLEAR REACTOR

А.Р. Третьяков¹, М.Н. Сергеев¹

¹ Рыбинский государственный авиационный технический
университет имени П. А. Соловьева,
Россия, 152934, Рыбинск, ул. Пушкина, 53

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА КАЧЕСТВО ИЗГОТОВЛЕНИЯ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ

Магнитные наножидкости широко применяются в различных областях техники. Они могут применяться для организации передачи движения от одних частей устройства к другим, так называемые магнитные муфты. Также магнитные жидкости используют для обеспечения герметичности соединений. Перспективным считается использование магнитных жидкостей в медицинских целях [1].

Одним из перспективных направлений использования магнитной жидкости является интенсификация с их помощью тепломассообменных процессов. Интенсификация теплообмена возможна за счет оптимизации характера движения теплоносителя. Это можно осуществит, например, путем закрутки потока. Также можно производить развитие поверхности теплообмена, например, оребрение поверхности. Перспективно также нанесение на поверхность лунок.

Применение магнитной жидкости позволяет реализовать другой способ интенсификации теплообмена, который заключается в изменении свойств жидкости на микроуровне. Если в первом случае производится управление потоком жидкости, то во втором управление переносится на её теплофизические свойства.

Физические свойства магнитной наножидкости, её качество, определяются методом получения. В данной работе используется метод химического осаждения [2]. Частицами, реагирующими на магнитное поле, являются частицы магнетита Fe_3O_4 . Стабилизация полученной магнитной наножидкости осуществляется с помощью алеата натрия.

Качество полученной жидкости можно оценить по величине частиц, из которых она образована. Частицы размером в несколько десятков микрон или микронного размера хорошо видны в обычный световой микроскоп. Для наблюдения частиц размером несколько десятков нанометров необходим электронный микроскоп. Однако, качество магнитной наножидкости можно косвенно определить по её поведению в магнитном поле. Хорошая, качественная магнитная наножидкость в достаточно сильном поле образует на поверхности заостренные участки, напоминающие иголки ежа. В жидкости низкого

качества можно наблюдать округлые выпуклости на месте воздействия магнита.

Чтобы улучшить качество магнитной жидкости в данной работе применялось ультразвуковое воздействие. Для этого использовалась ультразвуковая установка GT SONIC с частотой ультразвука 40 кГц.

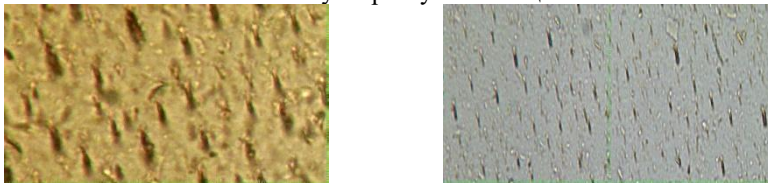


Рис. 1. Фотографии магнитных микрочастиц в магнитном поле до обработки жидкости звуком (слева) и после обработки (справа)

Как видно из рис.1 воздействие ультразвука привело к уменьшению размеров частиц. Продольные размеры частиц на рисунке слева равны в среднем 10 мкм.

Таким образом, можно сделать вывод, что воздействие ультразвукового поля на магнитную жидкость приводит к уменьшению комплексов, образуемых магнитными частицами.

Список литературы

1. S. Valiollah Mousavi, M. Barzegar Gerdroodbary, Mohsen Sheikholeslami and D. D. Ganji The influence of a magnetic field on the heat transfer of a magnetic nanofluid in a sinusoidal channel Eur. Phys. J. Plus (2016) 131: 347 <https://doi.org/10.1140/epjp/i2016-16347-4>
2. Патент № 2709870 С1 Российская Федерация, МПК C01G 49/08, H01F 1/44. Способ получения магнитной жидкости : № 2019115430 : заявл. 20.05.2019 : опубл. 23.12.2019 / В. С. Евдокимов, С. И. Евдокимов, Н. С. Евдокимова ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Горно-Металлургический Бизнес". – EDN YIWSPQ.

A.R.Tretyakov¹, M. N. Sergeev¹

¹ P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University,
Russia 152934, Rybinsk, Pushkin St., 53

**THE EFFECT OF ULTRASOUND ON THE
MANUFACTURING QUALITY OF MAGNETIC FLUID**

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ МОНОКРИСТАЛЛОВ

Введение. В связи с повышением требований к совершенству монокристаллов (дислокациям, микро - и макро-однородностям распределения примеси, увеличению размеров кристаллов) существует потребность в совершенствовании технологий и в увеличении объёма их производства монокристаллов. Процессы выращивания монокристаллов из расплава весьма чувствительны к характеру конвективного теплообмена, и имеют повышенные требования к управлению им. Для управления теплопереносом первостепенное значение имеют знание, умение и способность управлять структурой конвективного перемешивания, градиентами температуры и концентрации вблизи фронта кристаллизации (концентрационным переохлаждением), и как следствие, управлять скоростью кристаллизации и интенсификацией теплоотвода от растущего кристалла. Эффективным управляющим фактором конвективного теплообмена при выращивании монокристаллов, влияющим на совершенство кристаллов, на распределение температуры (примеси) и на скорость кристаллизации могут быть управляемые вибрации. Они являются наиболее простыми и энерго-экономичными чем, например, гравитация или магнитное поле.

Выполнены численные расчеты конвективного теплопереноса для метода Бриджмена с погруженным вибратором, метода Чохральского с поступательными вибрациями кристалла и с погруженным вибратором под растущим кристаллом, а также для метода зонной плавки с реальной криволинейной формы с учетом и без учёта следующих факторов: кривизны фронта кристаллизации и условий Стефана на нём, излучения, вращения, вибраций, гравитационной и термокапиллярной конвекции. Данные расчеты проведены как для расплавов интерметаллических полупроводниковых материалов (с числом Прандтля $Pr \ll 1$), так и для оксидов ($Pr > 1$). Результаты анализировались на установившемся квазистационарном режиме.

Результаты моделирования показали, что вибрации с малой амплитудой могут менять структуру конвективного течения, увеличивать нормальный градиент температуры на фронте кристаллизации, что может интенсифицировать теплообмен и скорость роста кристаллов.

Расчеты показали, что при существенном влиянии вибраций на структуру течения и распределение температуры и концентрации примеси, их влияние

на каждом периоде колебаний практически не сказывается на изменениях температуры у фронта кристаллизации. Например, для расплавов с числом Прандтля больше единицы, изменение температуры за один период колебаний не более одного процента.

Для метода плавающей зоны показано, что, как для больших, так и для малых чисел Прандтля ($Pr=0.01$) вибрационным воздействием можно уменьшать температурный пограничный слой и увеличивать нормальный градиент температуры на фронте кристаллизации.

Данная работа была поддержана грантом РФФИ № 24-29-00101.

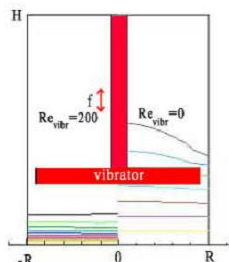


Рис. 1. Модель метода Бриджмена. Изотермы в расплаве NaNO_3 ($Pr=5.43$), справа – без вибраций, слева – с вибрациями $Re_{vibr}=200$

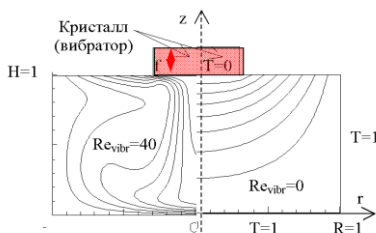
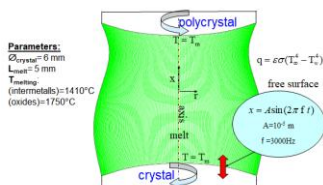


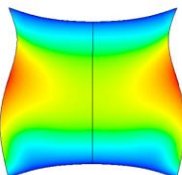
Рис. 2. Модель метода Чохральского. Изотермы в расплаве NaNO_3 ($Pr=5.43$, $H/R=1$, $R_c/R=0.3$). Справа - без вибраций ($Re_{vibr}=0$), слева при вибрациях кристалла с частотой $f=10\text{Гц}$ и амплитудой $A=100\text{мкм}$ ($Re_{vibr}=40$).



а)



б)



в)

Рис. 3. Метод зонной плавки кремния, а) – схема модели, б) – изотермы без вибраций, в) - при воздействии вибраций ($Pr=0.01$, $A=0.01\text{мм}$, $f=3\text{КГц}$).

A.I. Fedyushkin

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences,
Russia, 115526, Moscow, pr. Vernadskogo 101-1,

INTENSIFICATION OF HEAT AND MASS TRANSFER IN CRYSTAL GROWTH PROCESSES

А.В. Чукалин¹, О.В. Савелов¹, А.В. Петров¹

¹ Ульяновский государственный технический университет,
Ульяновск 432027, ул. Северный Венец, д.32 (*)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕМПФИРУЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ И КОМБИНИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

Введение. Разработка решений для эффективного управления пограничным слоем и их исследование на теплонагруженных поверхностях остается одной из ключевых задач прикладной инженерии. Натурные методы исследования пограничного слоя зачастую ограничены сложностью реализации. В этом контексте разработка новых подходов к моделированию и управлению пограничным слоем приобретает особую актуальность. В работе представлены результаты исследования демпфирующей поверхности и комбинированных систем управления на характеристики пограничного слоя, полученные с использованием реализованной в программном комплексе полуэмпирической модели турбулентного переноса.

Применяемые подходы и методы моделирования пограничного слоя.

Для моделирования и исследования пограничного слоя применяется модель Л. Прандтля, которая получена в ходе некоторого уточнения дифференциальных уравнений Навье-Стокса для второго предельного случая, а именно для условия низкой вязкости и высокой скорости потока. Для моделирования пограничного слоя в широком диапазоне газодинамических условий и при внешних интенсивных воздействиях Н.Н. Ковальновым предложены подходы к моделированию и замыканию системы уравнений [1]. С целью развития оригинальной полуэмпирической модели турбулентного переноса в пограничном слое дисперсных потоков с интенсивными воздействиями была проведена имплементация метода математического моделирования, описывающая воздействия демпфирующей поверхности на управление пограничным слоем [2].

Моделирование и исследование пограничного слоя.

Проведены комплексные исследования пограничного слоя при воздействии демпфирующей поверхности и комбинированных систем управления (рис.1). Эксперименты проведены при температуре потока $T = 1500\text{K}$, скорость на внешней границе пограничного слоя $u = 110\text{ м/с}$. В ходе экспериментальных расчетов варьировались параметры: температуры стенки $T_{ст} =$

(*) *А.В. Чукалин* Chukalin.andrej

0,8...0,99, температура вдува охладителя $T_{вд} = 0,7...0,85$, размер дисперсной фазы $G = 5^{-9}...5^{-7}$, градиент скорости $Ku = -0,1...0,1$. Расчеты выполнены для газа CO_2 .

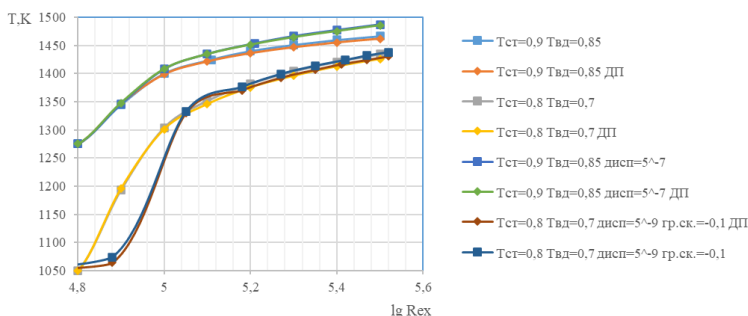


Рис.1. Результаты численного исследования демпфирующей поверхности и комбинированных систем управления на характеристики пограничного слоя, значения температуры на границе внешнего пограничного слоя.

Закключение.

Полученные результаты показывают, что применение демпфирующей поверхности позволяет снизить температуру на внешней границе пограничного слоя на величину до 12 К, при этом во внутренней области пограничного слоя влияние демпфирующих полостей раскрывается в большей степени, снижая градиент температуры на величину до 30 К.

Список литературы

1. Ковальногов Н.Н. Пограничный слой в потоках с интенсивными воздействиями. Ульяновск: УлГТУ, 1996. 246 с.
2. Approach to boundary layer modelling in the area of bodies with a dampening surface and development of a semi-empirical model of turbulent transport / Chukalin A.V., Petrov A.V., Sherkunov V.V., Kovalnogov V.N. // Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications. – 2025. – Vol. 13, No. 1.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01173, <https://rscf.ru/project/23-79-01173/>.

A.V. Chukalin¹, O.V. Savelov¹, A.V. Petrov¹

¹ Ulyanovsk State Technical University,
Ulyanovsk 432027, Severny Venets St., 32

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE DAMPING SURFACE AND COMBINED CONTROL SYSTEMS ON THE BOUNDARY LAYER CHARACTERISTICS

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ТЕЧЕНИИ В ТРУБЕ

Введение. Трубчатые теплообменные аппараты широко применяются в тепловых двигателях. Характер течения в теплообменном аппарате определяет интенсивность теплообменных процессов. В роторно-лопастном двигателе с внешним подводом тепла (РЛДВПТ) в трубчатом теплообменнике реализуется нестационарное пульсирующее течение, вызванное его периодическим массообменом с рабочими камерами [1].

Постановка. На долю однотипного по ширине элемента двигателя приходится одна U-образная трубка теплообменного аппарата (рис. 1). Трубка имеет круглое сечение радиуса $r=1\text{см}$, длина трубы $L=1.13\text{м}$. Размеры рабочих камер в угловом и радиальном направлении, а также угловые размеры окон газораспределения соответствуют значениям из работы [1].

Ширина w рабочих камер, входного и выходного коллектора определяет массовый поток, приходящийся на одну трубку теплообменного аппарата. Изменение ширины слоя происходит в коллекторах теплообменника. Ширина граней коллекторов, контактирующих с трубой, составляет 3см . На торцевых границах, определяющих ширину расчетной области, поставлено условие плоскости симметрии. На входной и выходной границе задается температура и давление, стенка трубы теплообменника имеет постоянную температуру (рис. 1). На остальных границах ставилось условие прилипания и тепловой изоляции.

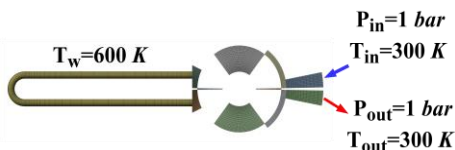


Рис.1. Расчетная область и сетка

Моделирование проведено в гибридной 2D-3D постановке. В камерах двигателя и коллекторах входа и выхода строится квазитрехмерная расчетная сетка, в трубке теплообменника и примыкающих к ней коллекторах сетка имеет трехмерную структуру. Для моделирования турбулентности использовалась URANS модель Realizable k-ε.

Для сравнения с теплообменом при стационарном течении рассматривалась расчетная область, состоящая только из трубки теплообменного аппарата. На входной грани трубы задавался массовый расход, температура и характеристики турбулентности, в выходном сечении задавалось противодавление. Используемые в граничных условиях значения получены в результате осреднения за период результатов нестационарного расчета.

Результаты. В проведенном исследовании расход газа в трубе увеличивался за счет изменения ширины элемента двигателя, которая принимала следующие значения $w=1, 1.2, 1.4, 1.6$ см. На рисунке 2 приведено сравнение мощности тепловыделения (а) и среднемассовой температуры на выходе из трубки (b) при пульсирующем и стационарном течении при разных значениях массового расхода. Значения приведенных величин для нестационарного течения получены путем осреднения за период.

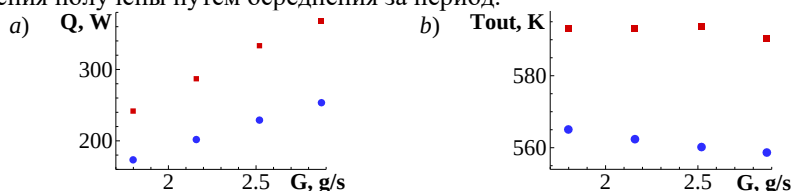


Рис. 2. Мощность тепловыделения (а) и среднемассовая температура на выходе из трубки (b) при пульсирующем (красные точки) и стационарном (синие точки) течении

Увеличение расхода сопровождается увеличением мощности тепловыделения (рис. 2а) и уменьшением температуры на выходе из трубки при стационарном течении (рис. 2b). На рисунке 2а видно, что мощность при нестационарном течении растет быстрее с увеличением расхода.

Закключение. В рассмотренном диапазоне массового расхода мощность тепловыделения при исследуемом нестационарном течении превышает мощность тепловыделения при стационарном течении на 30%.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект № 24-22-00175.

Список литературы

1. Koyokin, V. Yu., S. V. Bulovich Resonant mode of gas oscillations in the heat exchanger of a rotary-blade machine // 22-St international conference on the methods of aerophysical research (ICMAR 2024): Abstracts, Novosibirsk, 01–05 July 2024. – P. 104-106. – DOI 10.53954/9785604990148_104.

V. Yu. Koyokin^{1,2}, S. V. Bulovich^{1,2}

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia, Russia, 195251, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya, 29 B

²Ioffe Institute, Russia, 194021, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya, 26

INTENSIFICATION OF HEAT TRANSFER DURING UNSTATIONARY FLOW IN A PIPE

О ПРОСТОЙ МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОГО КОМПЛЕКСНОГО СЛЕДА ОТ ЦИЛИНДРОВ

Вводные замечания. Следовые течения это один из основных классов турбулентных течений, широко распространенный как в природе, так и в технике. Ближний след от группы цилиндров (комплексный след) может осуществляться в форме нескольких конкурирующих - перемежающихся глобальных мод течения. Моды следа отличаются между собой характерными частотами и амплитудами пульсаций, пространственной структурой течения (шириной и периодом вихревых структур), временем жизни вихревых дорожек за отдельными цилиндрами в группе. Соответственно, распределение интенсивности тепло- и массо-обмена в следе зависит от реализующейся моды течения. Для определенного класса задач целесообразно ограничиться (по крайней мере, на начальном этапе исследования/разработки) изучением динамики конкурирующих глобальных мод, скажем с целью минимизации вероятности реализации тех или иных нежелательных мод следа. Как для физического понимания ситуации, так и для оперативности серийных расчетов желательно иметь наиболее простую (аналитическую) модель течения.

Модель следов типа Ландау-Стюарта. Для ближнего следа от одиночного цилиндра известна простая одномерная динамическая модель дорожки Кармана – модель Ландау-Стюарта [1]. Предлагались обобщения этой модели на случай следа от двух параллельных цилиндров, установленных в плоскости перпендикулярной набегающему потоку, в частности [2]. В этой работе комплексный след моделируется в форме двух взаимодействующих между собой парциальных квазикармановских «шахматных» вихревых дорожек, по одной за каждым цилиндром. В рамках обобщения [2] удастся воспроизвести набор наблюдаемых в эксперименте глобальных мод такого комплексного следа, а также спектр базовых частот осцилляций в зависимости от интенсивности взаимодействия парциальных дорожек. В эксперименте, параметр интенсивность взаимодействия дорожек определяется, прежде всего, расстоянием между осями цилиндров. Всего в спектре насчитывается три моды. Первая мода имеет форму двух параллельных, одинаковых, синфазно-синхронизованных дорожек Кармана. Вторая мода это - две одинаковые, противофазно-синхронизованные дорожки Кармана. А третья мода представляет собой две дорожки, отличающиеся по всем своим характеристикам (амплитуда и частота осцилляций в ней, ширина и время жизни дорожки).

Уравнения модели [2] формулируются относительно управляющих параметров парциальных шахматных дорожек от отдельных цилиндров. Для сравнения с экспериментом управляющий параметр каждой дорожки отождествляется с поперечной составляющей скорости течения в характерной точке этой дорожки. Соответственно имеем систему из четырех ОДУ для медленно меняющихся (в масштабе периода пульсаций в дорожках) амплитуд и фаз осцилляций в двух дорожках Кармана. Система уравнений симметричная, допускает отделение подсистемы из трех «ведущих» уравнений (для двух амплитуд и разности фаз осцилляций). Из системы ОДУ конфигурацию и область существования первых двух мод не трудно получить в замкнутой форме [2]. Расчет третьей квазипериодической моды следует проводить либо численно, либо строить то или иное приближение. В предлагаемом сообщении представлены результаты построения соответствующего разложения по малому параметру модели (характеризующему фазозависимую интенсивность взаимодействия парциальных квазикармановских дорожек в комплексном ближнем следе) для конфигурации третьей моды. Согласно полученному разложению для установившегося течения по третьей моде следа, амплитуды пульсаций в двух парциальных дорожках Кармана испытывают сравнительно слабую модуляцию на разностной частоте пульсаций в двух дорожках. Одновременно имеет место фазовая модуляция пульсаций в двух дорожках на той же разностной частоте.

Работа выполнена с использованием средств государственного бюджета по госзаданию № 124012500440-9.

Список литературы

1. Sipp D., Lebedev A. Global stability of base and mean flows: a general approach and its applications to cylinder and open cavity flows // Journal of Fluid Mechanics, 2007. V. 593. P. 333-358
2. Гембаржевский Г.В., Осипенко К.Ю. Моделирование основных характеристик ближнего следа от пары цилиндров, расположенных бок о бок, не слишком близко // Известия РАН. МЖГ, 2023. № 6. С. 32-37

G.V. Gembarzhevskii

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences,
Russia, 119526, Moscow, Vernadsky av., 101-1

ON SIMPLE MODEL OF TYRBULENT COMPLEX WAKE FROM CYLINDERS

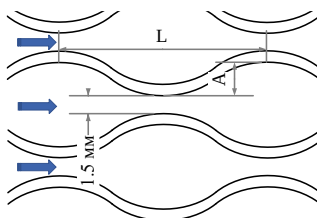
Д.В. Паторкин¹, И.А. Максимов¹, В.О. Киндра¹

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

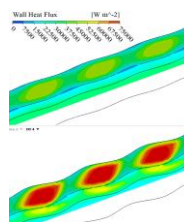
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КОНФУЗОРНО-ДИФFUЗОРНЫХ КАНАЛАХ

Эффективность перспективных энергетических комплексов во многом зависит от показателей работы теплообменного оборудования, поэтому на сегодняшний день стоит задача выбора поверхностей теплообмена, где будет достигаться максимальная интенсификация теплообмена при минимальных потерях давления. Одним из методов интенсификации является использование конфузорно-диффузорных каналов, где теплосъем растет за счет изменения структуры потока [1], однако малоизученным остается вопрос выбора оптимальных геометрических характеристик таких каналов.

В настоящей работе приведены результаты численного исследования конфузорно-диффузорных каналов, где геометрические параметры каналов изменяются по закону синуса. Проведен анализ влияния геометрических параметров (длины L и амплитуды расширения A) на теплогидравлические характеристики канала. На рисунке 1а представлен общий вид геометрии канала. Моделирование проводилось RANS методом, модель турбулентности – $k-\omega$ SST, параметр y^+ был равен 1.



а – вид геометрии



б – экзюры плотности теплового потока

Рис. 1. Вид геометрии канала и экзюры плотности теплового потока

Механизм интенсификации состоит в том, что при расширении канала профиль скоростей потока усредняется в направлении стенок, причем при некоторых углах раскрытия появляются пристеночные обратные токи. Это приводит к тому, что в области сжатия канала поток сталкивается с стенкой и срывает пограничный слой, что способствует увеличению теплосъема (рисунки 1б), однако этот эффект значительно зависит от геометрии канала.

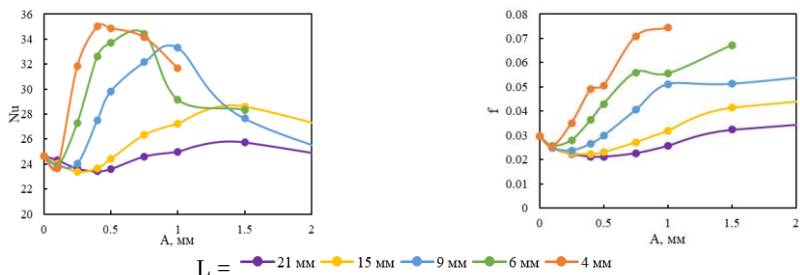


Рис. 2. Влияние геометрии каналов на f и Nu

На рисунке 2 приведены зависимости теплогидравлических характеристик каналов от геометрических параметров. Установлено, что максимальное число Нуссельта для каналов с конфузorno-диффузорной интенсификацией при числе Рейнольдса 10000 составляет 35.01 и достигается при $L = 4$ мм и $A = 0.4$ мм, а относительный прирост сравнительно с базовым каналом составляет 42.15%. Минимальный коэффициент потерь давления в каналах составляет 0.0213 и достигается при $L = 21$ мм и $A = 0.5$ мм, а относительный прирост сравнительно с базовым каналом составляет 28.6 %. Таким образом, применение конфузorno-диффузорной формы каналов может быть целесообразным в рассматриваемом диапазоне чисел Рейнольдса.

Исследование выполнено в Национальном исследовательском университете МЭИ за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10235, <https://rscf.ru/project/23-79-10235/>

Список литературы

1. Зонов, А. С. Численное исследование теплогидравлических характеристик конфузorno-диффузорных каналов / А. С. Зонов, А. С. Фандеев, В.О. Киндра // XXXVIII Сибирский теплофизический семинар: Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодых ученых. Тезисы докладов, Новосибирск, 29–31 августа 2022 года / Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. – Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2022. – С. 92.

D.V.Patorkin¹, I.A. Maksimov¹, V.O. Kindra¹

¹ National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,
Russia 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya St., 14/1

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF GEOMETRIC CHARACTERISTICS ON THERMOHYDRAULIC PROCESSES IN CONFUSOR-DIFFUSER CHANNELS

Г.С. Маршалова^{1,2}, Д.В. Островская², Е.С. Данильчик²

¹ Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси
220072, Республика Беларусь, Минск, ул. П. Бровки, д. 15

² Белорусский государственный технологический университет
220006, Республика Беларусь, Минск, ул. Свердлова, д. 13а

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА КОНВЕКТИВНУЮ ТЕПЛООТДАЧУ ОДНОРЯДНОГО ПУЧКА ИЗ ОРЕБРЕННЫХ ТРУБ С ВЫТЯЖНОЙ ШАХТОЙ

Аппараты воздушного охлаждения (АВО) нашли свое применение для решения огромного ряда технических задач в различных отраслях промышленности. Ввиду нахождения АВО вне помещения, на поверхности оребрения труб теплообменных секций образуется слой загрязнения, имеющий высокое термическое сопротивление, что приводит к снижению эффективности теплоотдачи. Данная проблема обуславливает актуальность изучения влияния внешнего слоя загрязнения на теплоотдачу пучка оребренных труб.

Схема экспериментальной установки для исследования свободно-конвективного теплообмена однорядного пучка из оребренных биметаллических труб с вытяжной шахтой, а также конструктивные и геометрические параметры используемых труб представлены в работе [1].

Вытяжная шахта высотой $H = 1,04$ м в данной работе используется в качестве побудителя движения воздуха, проходящего через однорядный пучок. Внешнее загрязнение межреберного пространства труб создавалось путем равномерного кольцевого наматывания льняного шнура. Толщина полученного загрязнения составила $\delta_z = 2,9$ и $4,5$ мм с неравномерностью $\pm 0,4$ мм.

Результаты эксперимента обрабатывались и представлялись в безразмерном виде – в числах подобия Нуссельта (1) от Рэлея (2).

Для сравнительного анализа влияния толщины внешнего загрязнения на свободно-конвективную теплоотдачу на рис.1 представлена графическая зависимость $Nu = f(Ra)$ при различных площадях выходного отверстия $f_{отв}$ от высоты вытяжной шахты H .

$$Nu = \frac{\alpha_k d_0}{\lambda}, \quad (1)$$

$$Ra = Gr Pr = \frac{g \beta d_0^3 (t_{ст} - t_0)}{\nu \alpha}, \quad (2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·°С); Gr – число Грасгофа; Pr – число Прандтля; g – ускорение свободного падения, м/с²;

$\beta = 1 / (273 + t_0)$ – коэффициент температурного расширения, K^{-1} ;
 ν – коэффициент кинематической вязкости, m^2/s ; a – коэффициент теплопроводности, m^2/s .

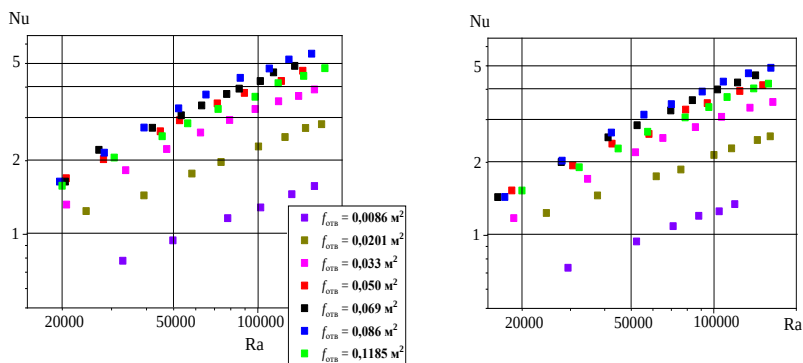


Рис. 1. Теплоотдача однорядного пучка оребренных труб с внешним межреберным загрязнением толщиной $\delta_3 = 2,9$ мм (слева) и $\delta_3 = 4,5$ мм (справа)

Анализ данных, представленных на рис. 1, позволяет сделать вывод, что увеличение толщины загрязнения с $\delta_3 = 2,9$ мм на $\delta_3 = 4,5$ мм (в 1,55 раза) приводит к снижению интенсивности теплоотдачи на 5–9 %. Также, как видно из графика, наблюдается такое значение площади выходного отверстия $f_{отв}$, при котором достигается максимальное значение числа Нуссельта. Согласно работе [1], снижение теплоотдачи обусловлено наличием циркуляционных (гейзерных) течений воздуха в шахте.

Список литературы

1. Маршалова Г. С. Тепловой расчет и проектирование аппаратов воздушного охлаждения с вытяжной шахтой: дис. ... канд. техн. наук : 01.04.14 / Г. С. Маршалова. – Минск, 2019. – 153 л.
2. Маршалова Г. С., Сухоцкий А. Б., Кунтыш В. Б. Повышение энергосбережения в аппаратах воздушного охлаждения интенсификацией внешнего теплообмена. Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2929. № 2. С. 3-7.

G.S. Marshalova^{1,2}, D.V. Ostrovskaya², E.S. Danil'chik²

¹ A.V. Luikov heat and mass transfer institute of NAS of Belarus,
 Belarus, 220072, Minsk, Brovki str., 15

² Belarusian State Technological University,
 Belarus, 220006, Minsk, Sverdlova str., 13a

**INFLUENCE OF EXTERNAL POLLUTION ON CONVECTIVE
 HEAT TRANSFER OF A SINGLE-ROW BUNDLE OF FINTED
 PIPE WITH AN EXHAUST SHAFT**

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ МОЩНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ

Введение. Активная термостабилизация и охлаждение оптоэлектронных устройств критически важны, поскольку даже небольшие изменения температуры могут существенно повлиять на их характеристики. Например, изменение температуры приводит к сдвигу спектра лазерных диодов и увеличению темнового тока фотодетекторов, что снижает их эффективность. С ростом мощности и интеграции элементов увеличивается тепловыделение, что требует более эффективных методов охлаждения [1-3]. В диапазоне температур эксплуатации от -60°C до 125°C применяются термоэлектрические модули (ТЭМ), позволяющие поддерживать заданную температуру, но обладающие высоким энергопотреблением. Оптимизация мощности ТЭМ является ключевой задачей для эффективности всего устройства. В данной работе рассматриваются системы термостабилизации с разными по максимальной холодопроизводительности ТЭМ в широком диапазоне температур окружающей среды.

Теоретическая часть. Как известно [4], ТЭМ могут работать в различных режимах, наиболее важными из которых являются: режим максимального холодильного коэффициента ε_{max} и режим максимальной холодопроизводительности Q_{max} . В случае работы в режиме максимального холодильного коэффициента ТЭМ наиболее эффективно преобразовывает электрическую энергию в тепловую, в режиме максимальной холодопроизводительности может быть получена максимальная глубина охлаждения в ущерб эффективности.

В задачах, где требуется термостабилизация объекта при определенной температуре в широком диапазоне температур окружающей среды, требуется оптимизация ТЭМ для максимизации холодильного коэффициента.

На эффективность системы с ТЭМ влияет теплоотводящая система, эффективность которой характеризуется величиной теплового сопротивления [5]. Величина теплового сопротивления определяет температуру теплоотводящей стороны ТЭМ и значительно влияет на режимы работы ТЭМ.

Экспериментальная часть. В данной работе представлено исследование энергопотребления различных по максимальной холодопроизводительности

и конструкции ТЭМ в зависимости от температуры окружающей среды и предложены методы по оптимизации энергопотребления систем с ТЭМ.

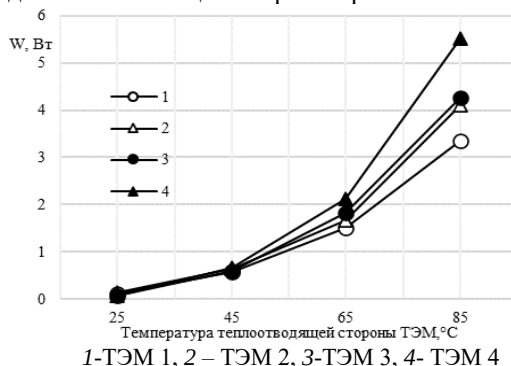


Рис. 1 Зависимость энергопотребления ТЭМ в зависимости от температуры окружающей среды в режиме термостабилизации

Как видно из рис. 1 потребляемая мощность ТЭМ с разной величиной максимальной холодопроизводительности немонотонно возрастает с ростом температуры окружающей среды.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-19-00840).

Список литературы

1. Дмитриев А.С. Введение в нанотеплофизику. М.: БИНОМ, 2015. 756 с.
2. X. Shi, J. Zou, Z. Chen. Advanced thermoelectric design: from materials and structures to devices, Chem. Rev. 120 (2020) 7399–7515.
3. Y. Cai, Y. Wang, D. Liu, F.-Y. Zhao, Thermoelectric cooling technology applied in the field of electronic devices: updated review on the parametric investigations and model developments, Appl. Therm. Eng. 148 (2019) 238–255
4. Булат Л.П., Бузин Е.В. Термоэлектрические охлаждающие устройства: Метод. указания для студентов спец. 070200 “Техника и физика низких температур”. СПб.: СПбГУНиПТ, 2001. 41 с.
5. Васильев Е.Н. Деревянко В.А. Анализ эффективности применения термоэлектрических модулей в системах охлаждения радиоэлементов.

D.V. Vorobyev, P.G. Makarov, I. A. Mikhailova

Moscow Power Engineering Institute
Russia 111250 Moscow, Krasnokazarmennaya Str., 14

RESEARCH AND OPTIMIZATION OF POWER CHARACTERISTICS OF THERMOELECTRIC MODULES

Д.А. Швецов¹, А.Н. Павленко¹, В.И. Жуков^{1,2}

¹ Институт теплофизики СО РАН им. С.С. Кутателадзе,
630090, Новосибирск, Академика Лаврентьева пр-т, 1^(*)

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

ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СЛОЯХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ НА ГРАДИЕНТНЫХ СЕТЧАТЫХ ПОКРЫТИЯХ

В данной работе представлены результаты исследования теплообмена при кипении в тонких горизонтальных слоях диэлектрической жидкости HFE-7100 на сетчатых покрытиях при давлениях 50 кПа и 100 кПа. Много-слойное сетчатое покрытие состоит из 6 сеток: 3-х mesh 80 и 3-х mesh 40. Более крупные сетки (mesh 40) находятся сверху, а мелкие (mesh 80) – снизу, из-за чего образуется градиентная структура «дымохода» (chimney), способствующая эффективному образованию пузырей [1]. Параметры сеток выбраны с учетом рекомендаций, предложенных в работе [2] для ацетона. Было изготовлено два образца многослойного градиентного сетчатого покрытия. В первом образце сетки накладывались друг на друга случайным образом. Во втором сетки укладывались ячейками соосно друг другу и были точно ориентированы для создания «дымохода».

В ходе экспериментов было установлено, что первый образец многослойного сетчатого покрытия со случайным расположением сеток позволяет получить низкий температурный напор начала кипения, но величина критического теплового потока (КТП) на данном покрытии очень низкая (рис. 1(а)). На втором образце сетчатого покрытия значения КТП выше по сравнению с первым. Из рис. 1(а) видно, что увеличение высоты слоя жидкости с 1.5 мм до 25 мм на градиентном сетчатом покрытии со случайным расположением сеток приводит к увеличению значения КТП на ~ 41 %. На покрытии с ориентированным расположением сеток увеличение высоты слоя жидкости с 2.5 мм до 25 мм приводит к росту величины КТП на ~ 245 %. На рис.1(б) приведено сравнение данных, полученных при кипении в слое жидкости высотой 25 мм на однослойных и многослойном сетчатых покрытиях и на поверхности без сеток. Установлено, что величина КТП, полученная на многослойном градиентном сетчатом покрытии, выше на ~ 25 %, чем на поверхности без сеток, а значения температурного напора

(*) Д.А. Швецов, shvetsov.kh301@ya.ru

в диапазоне тепловых потоков от 10 до 90 кВт/м² ниже на ~ 45 %. По сравнению с однослойными сетчатыми покрытиями на многослойном уменьшается температурный напор начала кипения и возрастает величина КТП.

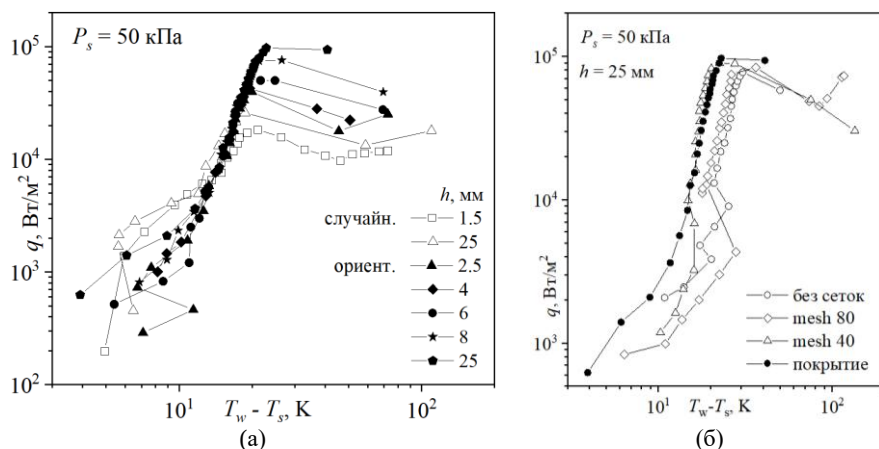


Рис. 1. Сравнение кривых кипения, полученных в горизонтальных слоях диэлектрической жидкости HFE-7100 при давлении 50 кПа: (а) – градиентные сетчатые покрытия со случайным и ориентированным расположением сеток; (б) – сравнение данных, на однослойных и многослойном сетчатых покрытиях с поверхностью без сеток.

Список литературы

1. Zhang S., Jiang X., Li Y., Chen G., Sun Y., Tang Y., Pan C. Extraordinary boiling enhancement through micro-chimney effects in gradient porous micromeshes for high-power applications // *Energy Conversion and Management*. – 2020. – Vol. 209. – P. 112665.
2. Толубинский В.И., Антоненко В.А., Иваненко Г.В. Влияние толщины слоя жидкости на критические тепловые нагрузки при кипении // *Промышленная теплотехника*. – 1988. – Т. 10, № 2. – С. 3–6.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-19-00245)

D.A. Shvetsov¹, A.N. Pavlenko¹, V.I. Zhukov^{1,2}

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

² Novosibirsk State Technical University,
Russia, 630073, Novosibirsk, K. Marks ave., 20

HEAT TRANSFER DURING BOILING IN HORIZONTAL LAYERS OF DIELECTRIC LIQUID ON GRADIENT MESH COATINGS

И.А. Малешин¹, В.Н. Ковальногов¹, Д.А. Генералов¹

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТРАТИФИКАЦИИ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ

Газодинамическая температурная стратификация сегодня имеет значительный интерес, представляя собой процесс разделения термически однородного газового потока на два потока: «горячий» и «холодный», которое достигается за счет перераспределения энергии в высокоскоростном потоке с использованием таких эффектов, как вихревой эффект Ранка-Хилша, волновые процессы, резонансная накачка, эжекция и других механизмов.

Эффективное применение газодинамической температурной стратификации позволяет открывать новые перспективы для совершенствования тепловой защиты термонагруженных элементов энергоустановок, в частности, компонентов газотурбинных установок, от воздействия высокотемпературного рабочего тела и рециркуляции отработанного теплоносителя. Использование «холодного потока» газа позволяет охлаждать элементы энергоустановки, подверженные воздействию экстремальных температур. В то же время «горячий поток» может быть направлен в камеру смешения для последующей подачи в топку.

Для решения поставленной задачи рассмотрен вихревой эффект Ранка-Хилша. Для проведения натурного экспериментального исследования процесса энергоразделения необходимо провести численный эксперимент с использованием методов математического моделирования. Для математического описания трехмерного течения газового потока в вихревой трубе используются уравнения неразрывности, уравнения импульсов и уравнения энергии. Вычислительное моделирование динамики жидкости и газа с учётом турбулентности проводится с использованием разных подходов. Одним из эффективных является подход, при котором используется широко распространенная $k-\epsilon$ модель турбулентности. На выходе из вихревой трубы Ранка-Хилша «горячий поток» попадает камеру смешения, а затем в топочное устройство. В топочных устройствах, сжигающих газ, необходимо учитывать значительное количество компонентов турбулентного потока, что затрудняет моделирование. В этой связи важно проанализировать различные методы моделирования горения, чтобы предсказать поведение пламени при горении, его структуру, длину факела, температуру и прочие факторы в области быстрых химических реакций.

Для моделирования процессов горения требуются модели, включающие взаимодействие между турбулентным потоком и химическими реакциями, протекающими в пламени. Математически процесс динамики реагирующей смеси описывали с помощью k - ϵ модели турбулентности, осредненного по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса (RANS). Пространственное распределение фронта горения и взаимодействия потоков пламени получали с помощью FGM-модели. Однако недостатком использования FGM-моделирования по сравнению с EDM-моделированием, еще одной технологией моделирования, является более длительное время вычислений. EDM-модель может применяться только тогда, когда требование CFD ограничено прогнозированием общих параметров данного топочного устройства или когда есть ограничение в вычислительной мощности. В настоящее время ведется отладка тестирования и верификация моделей. В докладе обсуждаются некоторые предварительные результаты моделирования в CFD среде Star-CCM с использованием оригинальных надстроек.

Исследования выполнены в Лаборатории междисциплинарных проблем энергетики, созданной в Ульяновском государственном техническом университете при поддержке мегагрантом Правительства Российской Федерации (проект 075-15-2021-584).

Список литературы

1. Jaggu N. , Alluru S.R., Balakrishna A., Kamasetty V. Анализ применения FGM- и EDM-моделей горения в горелках с частичным предварительным смешиванием для систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха //Теплоэнергетика, 2021. – № 11. – С. 62-70
2. Zeng Y. et al. Carbon-free power generation strategy in South Korea: CFD simulation for ammonia injection strategies through boiler burner configurations in tangentially fired boiler //Energy. – 2024. – Т. 309. – С. 133076.
3. Böncü E. et al. Numerical and experimental investigations of swirl-stabilized partially premixed flames using natural gas-hydrogen-air mixtures //Applied Thermal Engineering. – 2024. – Т. 254. – С. 123830.
4. Красинский Д.В. Численное моделирование процессов турбулентного горения метана при вдуве паровой струи в осесимметричной горелке //ГОРЕНИЕ ТОПЛИВА: ТЕОРИЯ, ЭКСПЕРИМЕНТ, ПРИЛОЖЕНИЯ. – 2021. – С. 85.

I.A. Maleshin ¹, V.N. Kovalnogov ¹, D.A. Generalov ¹

¹ Ulyanovsk State Technical University,
Russia 432027, Ulyanovsk, st. Severny Venets, 32

STUDY OF THE POSSIBILITIES OF GAS-DYNAMIC TEMPERATURE STRATIFICATION FOR INTENSIFYING THE COMBUSTION PROCESS

О. В. Митрофанова^{1,2}, И. Г. Поздеева^{1,2}, Н. А. Старовойтов¹

¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 31

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

СПИРАЛЬНО-ВИНТОВАЯ СТРУКТУРИЗАЦИЯ ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА ПРИ ПЕРЕХОДЕ К РЕЗОНАНСНОМУ РЕЖИМУ ТЕЧЕНИЯ

Использование закрученных потоков теплоносителей и рабочих сред для интенсификации процессов тепломассообмена довольно популярно в различных технических устройствах. Также закрутка потока возникает самопроизвольно в каналах сложной формы, при наличии препятствий, магнитного поля и т.д. Диагностика режимов течения закрученного потока по амплитудно-частотным характеристикам (АЧХ) генерируемого в процессе вихреобразования звука является полезным инструментом для мониторинга внутренней структуры теплоносителей и рабочих сред в каналах энергетических установок. Наиболее опасно совпадение вихревых частот с собственными частотами элементов теплогидравлического тракта и развитие резонансных процессов. В работе представлены экспериментальные результаты исследования перехода к резонансному режиму течения на примере импактного закрученного течения. Подробная схема установки и описание рабочего участка представлены в работе [1]. В экспериментах независимо фиксировались изменения во времени избыточного давления на входе, расхода воздуха через рабочий участок, мощности и спектра акустических колебаний. Также получены картины визуализации течения на верхней и нижней поверхностях выходной щели (рис. 1).

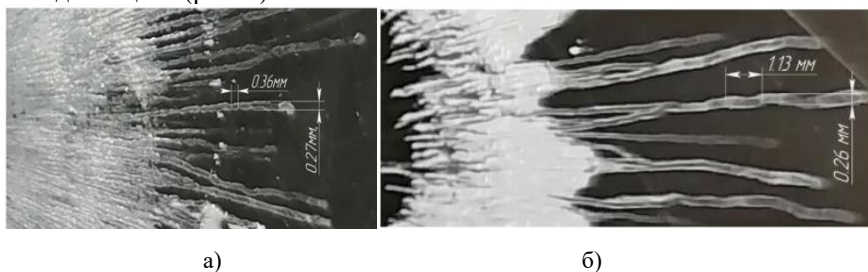


Рис. 1. Фрагменты визуализации вихревого следа, демонстрирующие структуру тонких спиральных вихрей: а — картина вихревого следа при расходе, равном 83% от предельного значения; б — картина вихревого следа при расходе, равном 42% от предельного значения

Характерные частоты вихревой структуры могут быть выделены в акустическом спектре задолго до возникновения резонансного режима, на стадии, когда амплитуда колебаний на этих частотах совсем незначительно превышает уровень шумов и фиксируется только микрофоном, а не наблюдателем. Следующим указанием на возможность развития резонансного процесса является достижение значения критического расхода, при котором, несмотря на рост давления на входе в рабочий участок, расход воздуха перестает расти. Этот процесс сопровождается значительным увеличением амплитуды акустических колебаний, их уже уверенно различает не только микрофон, но и наблюдатель. После достижения критического расхода система может перейти в режим биений или резонансный режим спонтанно, при взаимодействии акустического излучения, генерируемого вихревой структурой потока, с собственными колебаниями вихревой камеры. В этих режимах происходит возрастание мощности акустического излучения вследствие перестройки структуры течения для снижения диссипативных потерь и возникновения притока воздуха из внешней среды. На картинах визуализации отчетливо видно образование спиральных вихрей, выносящих расход, можно определить их размеры и шаг закрутки. Еще одним ценным результатом является визуализация области возвратного течения, отчетливо различимая на рис. 1, б. Таким образом, основные диссипативные потери сосредоточены в пределах акустического пограничного слоя [2], а за его пределами формируется бездиссипативное спирально-винтовое течение. Так как толщина акустического пограничного слоя δ зависит от частоты акустических колебаний f как $\delta \sim f^{-1/2}$, то при возбуждении колебаний на более высокой частоте в резонансном режиме толщина пограничного слоя уменьшается.

Список литературы

1. О. В. Митрофанова, И. Г. Поздеева, Н. А. Старовойтов Экспериментальные исследования устойчивой формы вихревой структуры закрученного течения // Инженерно-физический журнал, т. 98 № 1, с. 218-228
2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Т. IV. Гидродинамика. Москва: Наука, 1986.

O. V. Mitrofanova^{1,2}, I. G. Pozdeeva^{1,2}, N. A. Starovoitov¹

¹ National Research Nuclear University MEPhI, Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe sh 31

² National Research Center "Kurchatov Institute", Russia, 123182 Moscow, Akademika Kurchatova pl., 1

SPIRAL-SCREW STRUCTURING OF A TWISTED FLOW DURING THE TRANSITION TO A RESONANT FLOW REGIME

М.Д. Филиппов^{}, А.В. Беляев, А.В. Дедов*

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

^{*}E-mail: filippovmd@mpei.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИФИКАЦИИ КИПЕНИЯ НА ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Исследование процессов кипения на структурированных поверхностях с различными геометрическими параметрами остается одной из наиболее востребованных задач уже более 10 лет. Современные тенденции направлены на поиск новых технических решений для повышения эффективности теплообмена, где ключевыми показателями выступают коэффициент теплоотдачи (КТО), критические тепловой поток (КТП), долговечность и простота обслуживания поверхности кипения. В литературе имеется огромное количество исследований процессов кипения на поверхностях с различными модификациями, что подтверждается множеством подобных обзоров [1, 2]. В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования теплообмена в условиях кипения воды при атмосферном давлении на плоской поверхности, над которой были установлены небольшие круглые пластины на регулируемой высоте. Описание такого способа интенсификации кипения в литературе не обнаружено, что открывает новое направление для исследований. Наиболее близкая по характеру, но не по идеи, конструкция была реализована в работе [3].

Экспериментальный стенд представлял собой нагревательный блок с исследуемым образцом, помещенный в открытый сосуд с дистиллированной водой. Температура воды была близка к температуре кипения. В экспериментах измерялись средне интегральная температура стенки нагреваемой поверхности и плотности теплового потока. Подробное описание стенда и методики проведения опытов изложено в [4].

На первом этапе исследований были получены кривые кипения (рис. 1) на гладкой поверхности и с установленной в центре пластиной различного диаметра ($d_n = 10, 7,5$ и 5 мм). На рис. 2 а) представлена схема установки пластины. Высота зазора h изменялась от 0 до 0,6 мм. При максимальной высоте зазора $h = 0,6$ температурный напор снизился в среднем на 17%, с максимальным эффектом до 20%.

На втором этапе получены кривые кипения для гладкой поверхности, на которой было установлено пять пластин, диаметр которых был определён по результатам первого этапа. Схема размещения показана на рис. 2 б). Результаты будут представлены на конференции.

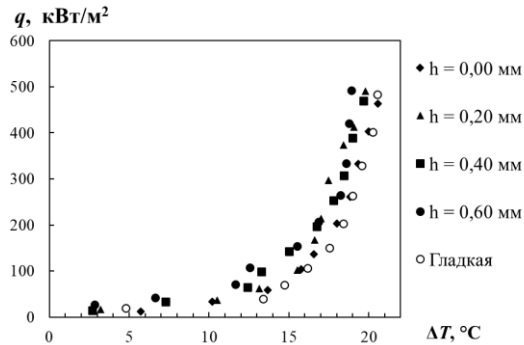
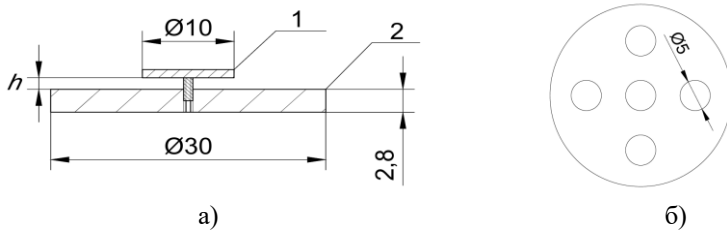


Рис. 1. Кривые кипения, полученные с одной пластиной $d_{\text{п}} = 10$



1 – винт с круглой пластиной (латунь); 2 – медная нагреваемая пластина-основание
Рис. 2. Схема образца с регулируемым зазором:

а) схема установки одной пластины; б) схема размещения пяти пластин

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 24-19-00403.

Список литературы

1. Дедов, А. В. Обзор современных методов интенсификации теплообмена при пузырьковом кипении // Теплоэнергетика, 2019. Т. 66. № 12. С. 881-915.
2. Володин, О. А. Интенсификация теплообмена при кипении и испарении жидкостей на модифицированных поверхностях / О. А. Володин, Н. И. Печеркин, А. Н. Павленко // Теплофизика высоких температур. – 2021. – Т. 59, № 2. – С. 280-312.
3. Aranya Chauhan, Satish G. Kandlikar, Geometrical effects on heat transfer mechanisms during pool boiling in Dual Tapered Microgap with HFE7000, International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 183, Part B, February 2022, 122165, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122165>.
4. Дедов, А. В. Простой способ увеличения критического теплового потока при кипении / А. В. Дедов, М. Д. Филиппов // Теплоэнергетика. – 2024. – № 1. – С. 99-108.

M. D. Filippov¹, A. V. Belyaev¹, A. V. Dedov¹

¹ National Research University "MPEI", 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya, 14

М.Д. Филиппов^{}, А.В. Дедов*

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

^{*}E-mail: filippovmd@mpei.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ НА СТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Теплообмен при кипении является одним из ключевых процессов теплопередачи, который играет важную роль в различных промышленных и энергетических системах. Этот процесс зависит от множества факторов, таких как свойства поверхности нагрева, физико-химические характеристики рабочей среды, а также внешние условия, включая давление и температуру. В связи с растущими требованиями к энергоэффективности и устойчивости технологий, современные исследования направлены на поиск новых подходов к интенсификации теплообмена при кипении. Особое внимание уделяется разработке и применению модифицированных поверхностей, которые способны значительно улучшить теплопередачу [1, 2]. В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований теплообмена при кипении насыщенной диэлектрической жидкости метоксинафторбутан (Novec 7100) в большом объеме. В качестве объектов исследования использовались образцы из меди, модифицированные электронным лучом. Эксперименты проводились в диапазоне давлений от 1 до 4 атмосфер, что позволило изучить влияние давления на интенсивность теплообмена.

Экспериментальный стенд представлял собой нагревательный блок с исследуемым образцом, помещенный в герметичный сосуд. В качестве рабочей жидкости использовался Novec 7100. Более подробное описание стенда и методики проведения опытов изложено в [3].

Модификации электронным лучом на медные образцы наносились при помощи электронно-лучевого комплекса АЭЛТК-344-12, с использованием технологии Surf-i-Sculpt. Для формирования рельефной поверхности электронный луч двигался вдоль траектории в форме «звезды» с шестью лучами. Направление движение электронного луча происходило в режиме «обратный ход» – движение луча от края к центру.

Фотография образца, модифицированного электронным лучом, представлена на рисунке 1.

В результате проведенных экспериментов были получены кривые кипения для всех образцов в диапазоне давлений от 1 до 4 атм, а также значения

критических тепловых потоков (рис. 2).



Рис. 1. Фотография образца из меди, модифицированного электронным лучом.

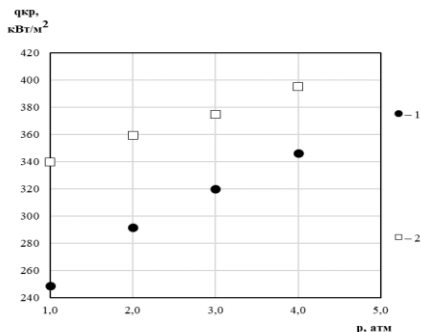


Рис. 2. Зависимость критического теплового потока $q_{кр}$ от давления p для всех образцов: 1 – медь без модификации; 2 – образец, модифицированный электронным лучом;

Анализ результатов образцов, модифицированных электронным лучом показал, что медный образец достиг увеличения КТП на 37% по сравнению с гладкой поверхностью. Данные по всем структурированным образцам будут представлены на конференции.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 24-19-00403.

Список литературы

1. Дедов, А. В. Обзор современных методов интенсификации теплообмена при пузырьковом кипении // Теплоэнергетика, 2019. Т. 66. № 12. С. 881-915.
2. Павленко, А. Н. Кризисные явления и интенсификация теплообмена при кипении и испарении в горизонтальных пленках жидкости (обзор) / А. Н. Павленко, В. И. Жуков, Д. А. Швецов // Теплоэнергетика. – 2022. – № 11. – С. 81-97.
3. Дедов, А. В. Простой способ увеличения критического теплового потока при кипении / А. В. Дедов, М. Д. Филиппов // Теплоэнергетика. – 2024. – № 1. – С. 99-108.

M. D. Filippov¹, A. V. Dedov¹

¹ National Research University "MPEI", 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya, 14

М.В. Малеваный¹, Д.А. Коновалов^{1,2}, Е.В. Крылова²

¹ Воронежский государственный технический университет,
Россия, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84;

² Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Россия, 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1.

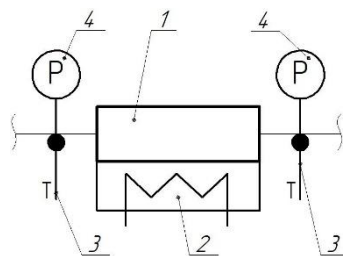
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ПОМОЩИ ТЕПЛООБМЕННИКОВ С НЕОДНОРОДНОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДОЙ

В настоящее время актуальным направлением исследований является интенсификация теплогидравлических процессов в системах с пористыми теплообменными элементами. Одним из перспективных способов повышения эффективности подобных систем является использование неоднородных пористых конструкций [1,2]. Однако экспериментальные исследования теплогидравлических процессов по данному направлению требуют формирования более глубокой базы данных.

В данной работе авторами был разработан и изготовлен экспериментальный стенд (рис.1) для проведения теплогидравлических исследований опытных образцов компактных теплообменников. Функционал стенда позволяет регулировать расход теплоносителя через теплообменные элементы, производить измерения значений температуры и расхода теплоносителя на входе и на выходе из исследуемого участка, где подводится нагрев к нижней части пластины, имеющей пористую среду однородного или неоднородного характера для интенсификации процесса охлаждения.



а)



б)

Рис. 1. Экспериментальный стенд. а) – фото стенда; б) – принципиальная схема рабочего участка: 1 – исследуемый охлаждаемый пористый образец, 2 – нагревательный элемент, 3 – датчики температуры, 4 – датчики давления.

Для данного исследования были специально спроектированы и созданы с помощью 3Д-печати экспериментальные образцы из алюминия с решетками с однородной и неоднородной пористостью (рис.2), к нижней части которых подводится тепловой поток, а верхняя герметично закрывается крышкой с возможностью подвода и отвода охлаждающей жидкости в пористую решетчатую зону на время проведения эксперимента.

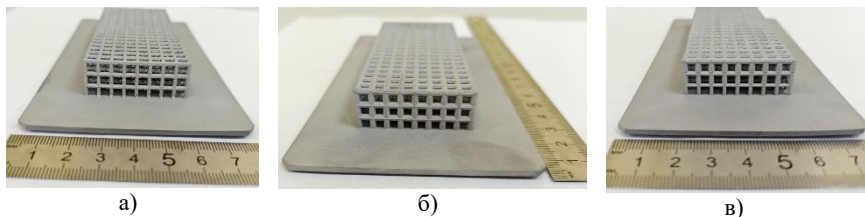


Рис. 2. Теплообменные элементы с пористыми решетками. а), б) – решетки с однородной пористой структурой, в) – решетка с неоднородной пористой структурой, изменяющейся по высоте.

В результате проведенных экспериментальных исследований было выяснено, что интенсифицирующие теплообмен решетки с неоднородной пористой структурой могут улучшить теплообмен без значительного увеличения гидравлического сопротивления и демонстрируют более высокие показатели эффективности, чем решетки с однородной пористой структурой.

Список литературы

1. Малеваный М.В., Коновалов Д.А., Кожухов Н.Н., Черниченко В.В. Однофазный конвективный теплоперенос в компактном теплообменнике, заполненном анизотропной пористой средой // Вестник ДонНУ. Серия Г: Технические науки. – 2024. – № 4. С. 193-200.
2. М.В. Малеваный, Д.А. Коновалов Численное моделирование однофазного охлаждения канала, заполненного пористой средой в условиях изменяющейся внутренней геометрии // Материалы IV Международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (СПТЭ). Москва, 21-25 октября 2024 г. – М.: Издательство МЭИ, 2024. С. 50-51.

M.V. Malevany¹, D.A. Konovalov^{1,2}, E.V. Krylova²

¹ Voronezh State Technical University,

Russia, 394006, Voronezh, st. 20th anniversary of October, 84;

² National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,

Russia, 111250, Moscow, st. Krasnokazarmennaya, 14, building 1.

EXPERIMENTAL STUDIES OF SURFACE COOLING USING HEAT EXCHANGERS WITH A HETEROGENEOUS POROUS MEDIUM

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕЧЕНИЯ В ТРУБЕ ЛЕОНТЬЕВА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПРИМИРОВАНИЯ ГАЗА

Повышение энергоэффективности промышленных объектов в различных отраслях требует разработки новых методов интенсификации теплообмена, обеспечивающих сокращение энергозатрат и повышение производительности оборудования. Особое значение в этом направлении имеет метод газодинамической температурной стратификации (ГТС), реализуемый в устройстве, известном как труба Леонтьева. Суть метода заключается в осуществлении теплообмена между дозвуковой и сверхзвуковой частями потока, разделенными теплопроводной поверхностью [1]. При значениях коэффициента восстановления меньше единицы температура стенки со стороны сверхзвукового потока (температура восстановления) оказывается ниже температуры торможения со стороны дозвукового потока. Это создает перепад температур, который инициирует тепловой поток от дозвуковой части течения к сверхзвуковой. Актуальность исследования обусловлена необходимостью совершенствования теплообменных процессов в условиях строгих экологических норм и роста требований к энергоэффективности, что требует разработки высокопроизводительных и экономичных решений.

Для повышения эффективности ГТС применяют различные решения:

1. Использование тепловых труб. В работе [2] показано, что при этом интенсивность теплообмена возрастает в 2–3 раза.
2. Выбор рабочего тела. Газ с высокой теплопроводностью, например гелий, заметно повышает эффективность ГТС.
3. Оптимизация коэффициента восстановления температуры. Изменение параметров потока, таких как давление и число Маха, может привести к повышению энергоразделения в трубе Леонтьева за счет снижения коэффициента восстановления температуры [3].
4. Дисперсное рабочее тело. Введение дисперсной фазы способно повысить передаваемый тепловой поток до 3,77 раза [4].

Хотя труба Леонтьева на практике пока не нашла широкого применения, ее гипотетическая возможность использования на автомобильных газонаполнительных компрессорных станциях (АГНКС) и газораспределительных станциях (ГРС) представляется перспективной.

На АГНКС труба Леонтьева может интегрирована в блоках осушки компримированного природного газа (КПГ). Холодная фракция газа

направляется потребителю, а горячая фракция используется для регенерации адсорбента в адсорберах. Это позволяет сократить время нагрева газа после редуцирования и значительно снизить мощность электронагревателя, тем самым повышая энергоэффективность процесса осушки [5].

На ГРС применение ГТС способствует стабилизации температур при редуцировании газа, предотвращая образование гидратов и снижая риски повреждения оборудования.

Совершенствование методов расчёта теплообмена и газодинамических параметров, а также оптимизация конструкции трубы Леонтьева позволяют повысить эффективность тепловых процессов и снизить потери энергии в газовых потоках. Применение ГТС в блоке осушки КПП на АГНКС демонстрирует практическую ценность технологии для снижения энергозатрат, а внедрение на ГРС подтверждает её универсальность.

Дальнейшие исследования позволят расширить сферы её применения, способствуя энергоэффективности и снижению экологических нагрузок.

Исследование выполнено при поддержке гранта Президента РФ по проекту НШ-28.2022.4.

Список литературы

1. Леонтьев А.И. Температурная стратификация сверхзвукового газового потока // Доклады академии наук. Энергетика, 1997. – Т. 354. – N 4. – С. 475-477.
2. Цынаева А.А., Цынаева Е.А., Школин Е.В. Об использовании тепловых труб для повышения эффективности газодинамической температурной стратификации // Вестник Самарского
3. Макаров М. С. Газодинамическая температурная стратификация в сверхзвуковых потоках: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.14 / Новосибирск, 2007. – 146 с.
4. Ковальногов Н. Н., Фокеева Е. В. Оптимизация параметров процесса газодинамической температурной стратификации в дисперсном потоке // Проблемы энергетики. – 2010. – № 11–12.
5. Ковальногов В.Н., Цветова Е.В., Матвеев А.Ф., Рудник Р.С., Киреев И.Д. Устройство осушки компримированного природного газа // Патент на изобретение RU 2790902 C1, 28.02.2023. Заявка № 2022117695 от 30.06.2022.

V.N. Kovalnogov¹, R.S. Rudnik¹, A.F. Matveev¹

¹ Ulyanovsk State Technical University,
32 Northern Venets Street, Ulyanovsk, 432027, Russia

OPTIMIZATION OF FLOW PARAMETERS IN THE LEON'TYEV TUBE FOR ENHANCING THE ENERGY EFFICIENCY OF GAS COMPRESSION

С.С. Петухов А.Ю. Верецагин А.В. Новожилова

Северный (Арктический) федеральный
университет имени М.В. Ломоносова,
Россия, 163007, г. Архангельск, наб. Северной Двины, 17

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОБОДНО-КОНВЕКТИВНОЙ ТЕПЛООТДАЧИ ШЕСТИРЯДНОГО ПУЧКА ИЗ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ РЕБРИСТЫХ ТРУБ

Во многих отраслях промышленности используются газожидкостные теплообменные аппараты из оребренных труб. Ряд отечественных предприятий освоили выпуск биметаллических ребристых труб (БРТ) с ленточным оребрением, что позволяет снизить толщину стенки ребра, расход алюминия и металлоемкость аппарата.

Широкое распространение в промышленности получили аппараты воздушного охлаждения (АВО) с шестирядными шахматными пучками из БРТ. Как правило, они работают в условиях вынужденной конвекции. В случае отключения вентилятора аппараты работают в условиях естественной конвекции. Расчет АВО проводят на температуру охлаждающего воздуха в летний период. При понижении температуры воздуха температурный напор в АВО возрастает, что позволяет отключить вентилятор, и аппарат работает в условиях естественного охлаждения.

Было проведено исследование теплоотдачи шестирядного пучка с равно-сторонней шахматной компоновкой $S_1 = S_2' = 64$ мм из БРТ с ленточным оребрением производства ЗАО «Октябрьскиммаш» с параметрами оребрения $d \times d_0 \times h \times s \times \Delta \times l = 48 \times 25,8 \times 11,1 \times 3,125 \times 0,35 \times 400$ мм, коэффициент оребрения $\phi = 11,2$.

Результаты исследований представлены на рис. 1. Из графика видно, что теплоотдача труб падает с каждым рядом. Теплоотдача труб первого и второго ряда наиболее высокая и составляет 1,6...3,8 Вт/(м²·К). Связано это с тем, что температурный напор в первых рядах высокий и поток холодного воздуха движется интенсивно за счет общей тяги через пучок. Однако тесная компоновка повышает аэродинамическое сопротивление теплообменника и в условиях естественной конвекции в многорядном пучке не хватает тяги для эффективного отвода тепла. Уже после второго ряда набегающий воздух идет подогретый и температурный напор на последующих рядах падает, вследствие чего падает и теплоотдача рядов. Начиная с третьего ряда она резко снижается на 35 %. В самых худших условиях находится шестой ряд пучка, где теплоотдача находится на низком уровне и составляет всего лишь

47 % от теплоотдачи первого ряда.. Общая теплоотдача шестирядной модели теплообменника находится на уровне теплоотдачи 3-4 рядов пучка.

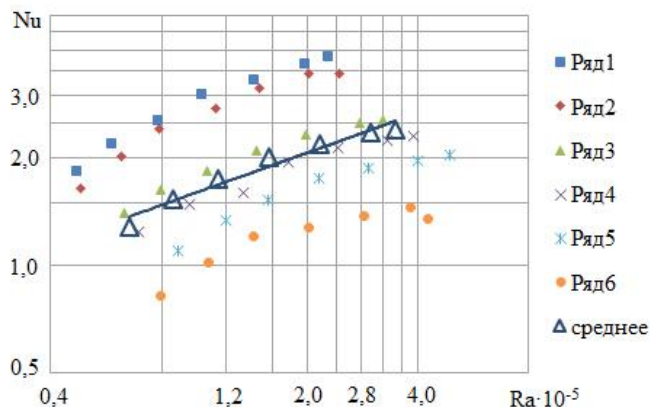


Рис. 1. Теплоотдача шестирядного равностороннего пучка.

Теплоотдача по каждому ряду, а также всего пучка была аппроксимирована уравнениями, представленными в таблице.

Таблица. Уравнения теплоотдачи шестирядного пучка.

Ряд	Уравнение	Ряд	Уравнение
1 ряд	$Nu = 0,0165 \cdot Ra^{0,4453}$	4 ряд	$Nu = 0,0224 \cdot Ra^{0,3641}$
2 ряд	$Nu = 0,0132 \cdot Ra^{0,4555}$	5 ряд	$Nu = 0,0232 \cdot Ra^{0,3461}$
3 ряд	$Nu = 0,0274 \cdot Ra^{0,3612}$	6 ряд	$Nu = 0,0358 \cdot Ra^{0,2881}$
Среднее по пучку		$Nu = 0,0229 \cdot Ra^{0,3689}$	

Список литературы

1. Кунтыш В.Б., Кузнецов Н.М. Тепловой и аэродинамический расчеты теплообменников воздушного охлаждения. – СПб.: Энергоатомиздат, 1992. – 280 с.
2. Пиир А.Э., Верещагин А.Ю. Сопоставление эффективности пучков из труб с различными коэффициентами оребрения и термическим контактным сопротивлением. Материалы научно-практической конференции «Перспективы и проблемы освоения нефтегазовых месторождений приарктической зоны России». Архангельск: САФУ, 2016. С. 169-174.

S.S. Petuhov, A.Yu. Vereshchagin, A.V. Novozhilova

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov,
Russia 163007, Arkhangelsk, Severnaya Dvina Embankment, 17

RESEARCH OF FREE-CONVECTIVE HEAT TRANSFER OF A SIX-ROW BUNDLES FROM BIMETALLIC RIBBED TUBES

С.Ю. Нечипорук¹, В.С. Захаров¹, А.Ф. Алибаев¹, Д.А. Павлов¹

¹ Федеральное автономное учреждение
«Центральный Институт Авиационного Моторостроения имени П.И. Баранова»,
Россия, 111116, Москва, ул. Авиамоторная, 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УДАЛЕНИЯ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ПРИ ОБТЕКАНИИ ПЛОСКОЙ ПЕРФОРИРОВАННОЙ ПЛАСТИНЫ

Исследование методов устранения отрывных зон и причин образования чрезмерного пограничного слоя является актуальной фундаментальной задачей [1-4]. В качестве некоторых значимых следствий рассматриваемого эффекта можно выделить изменение величины импульса потока и возрастание тепловых потоков на отдельных участках обтекаемой поверхности. Одним из необходимых условий возникновения отрыва потока является наличие положительного градиента давления в направлении течения. Для устранения возможности образования чрезмерного пограничного слоя зачастую применяют перфорацию или сливные отверстия различных форм, уменьшающие градиент давления. Пример такого решения рассмотрен в работе [5], в которой приведены результаты расчётов и зависимости характеристик потока от толщины зазора между двумя пластинами.

Для более детального исследования влияния формы и расположения сливных отверстий на величины толщин вытеснения пограничного слоя и потери импульса потока была проведена серия численных трёхмерных расчётов. Расчёты проводились при варьировании двух критериев подобия - числа Маха и числа Рейнольдса, в широком диапазоне. Оценка параметров проводилась в контрольных сечениях, расположенных до и после обозначенной перфорации. В качестве инструмента для решения поставленной задачи использовались программные комплексы моделирования газовой динамики на основе решения осредненной по Рейнольдсу системы уравнений Навье-Стокса методом конечных объемов. В результате проведенного исследования было выявлено наиболее эффективное расположение сливных отверстий с точки зрения минимизации величины потери импульса. Была произведена оценка влияния форм сливных отверстий на толщину вытеснения пограничного слоя.

Список литературы

1. Чжен П. Отрывные течения. М.: Мир, 1972, 298 с.

2. Поливанов П. А., Хотяновский Д.В., Кутепова А.И., Сидоренко А.А. Исследование различных подходов к моделированию ламинарно-турбулентного перехода в сжимаемых отрывных течениях // Прикладная механика и техническая физика, 2020, т. 61, № 5, с. 40-51.
3. Катасонов М.М., Каприлевская В.С., Козлов В.В., Павленко А.М. Исследование влияния распределенного отсоса пограничного слоя на течение за трёхмерным элементом шероховатости на модели прямого крыла // Теплофизика и аэромеханика, 2021, т. 28 № 4, с. 493-508.
4. Матяш И.С. Об особенности трехмерного отрывного течения в осесимметричном канале криволинейной формы // Ученые записки ЦАГИ, 2022, т. 53, № 3, с. 11-19.
5. Краснов Н.Ф., Кошевой В.Н., Калугин В.Т. Аэродинамика отрывных течений. М.: Высшая школа, 1988, 347 с.

S.Yu Nechiporuk¹, V.S. Zakharov¹, A.F. Alibaev¹, D.A. Pavlov¹

¹ Federal autonomous institution
«Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov»,
Russia, 111116, Moscow, Aviamotornaya str., 2

INVESTIGATION OF THE EFFECTIVENESS OF A BOUNDARY LAYER REMOVAL FROM THE SURFACE OF A STREAMLINED PERFORATED PLATE

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ УПРАВЛЕНИЯ КОНТАКТНОЙ ТЕПЛОВОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЗАДАННЫХ ПРОФИЛЕЙ ШЕРОХОВАТОСТИ

С быстрым развитием науки и техники появляется все больше и больше новых типов конструкций машиностроения и приборостроения, подверженных нагреванию. Часто возникает задача предотвращения их перегрева.

Для решения проблемы теплоотдачи конструкций машиностроения и приборостроения выполняется моделирование теплового поведения этих конструкций. Необходимо улучшить шероховатость поверхности между частями контактной теплопроводности [1].

Современное улучшение контактной теплопроводности с точки зрения шероховатости заключается во введении искусственной шероховатости [2], которая не только повышает эффективность теплопередачи, но и влияет на контактную теплопроводность через сложный физический механизм.

Искусственная шероховатость обычно достигается путем создания определенных геометрических структур на поверхности материала. Эти структуры могут представлять собой микроскопические выступы или другие формы, призванные увеличить количество точек контакта и площадь контакта, тем самым повышая эффективность теплообмена. Эти структуры могут быть получены различными методами [3,4], такими как механическая обработка, химическая обработка, нанесение покрытий или использование специальных технологий.

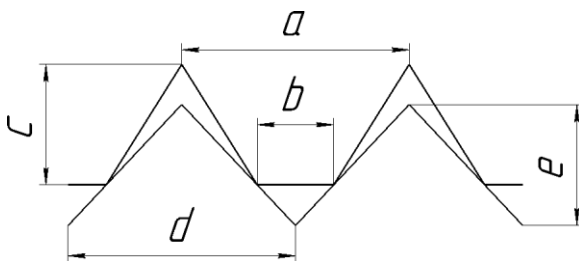


Рис. 1. Треугольный профиль искусственной шероховатости

Применение различных типов шероховатости к поверхностям имеет решающее значение, например, треугольные, закругленные и т.д. Мы применили ANSYS для моделирования поверхностей шероховатости с различными

ми параметрами, чтобы найти профиль шероховатости с максимальной фактической площадью контакта.

Разработан профиль искусственной шероховатости, показавший повышенный коэффициент контактного теплообмена (Рис. 1).

Смоделирована теплопередача этого профиля для различных параметров. При этом вычислялась фактическая длина контакта отдельно для каждого набора параметров и отношение фактической длины контакта к номинальной длине контакта. Максимальное значение этого соотношения соответствовало профилю шероховатости с наилучшим контактным теплообменом.

Проведенное всестороннее моделирование показало потенциальную возможность применения искусственной шероховатости для улучшения теплопередачи. Ожидается, что интерес к искусственной шероховатости будет расти по мере ее дальнейшего использования в областях теплоотдачи, что будет способствовать исследованиям в области контактной механики и теплопередачи.

Список литературы

1. Fractal analysis of the thermal contact conductance for mechanical interface / H. Wang, Y. Liu, Y. Cai et al. // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, V.169, 120942. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.
2. Ezhov A.D., Bykov L.V., Golikov N.S. Assessment of the influence of contact surface roughness on thermal conductivity // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, V.971, 042047, DOI 10.1088/1757-899X/971/4/042047.
3. Bushunov A.A., Tarabrin M.K., Lazarev V.A. Review of Surface Modification Technologies for Mid-Infrared Antireflection Microstructures Fabrication // Laser & Photonics Reviews, V.15(5), 2000202. DOI:10.1002/lpor.202000202.
4. Design Rules for Laser-Treated Icephobic Metallic Surfaces for Aeronautic Applications / V. Vercillo, S. Tonnichia, J. Romano et al. // Advanced Functional Materials, 2020, V.30(16), 1910268. DOI:10.1002/adfm.201910268.

C.Wang¹, M.V. Murashov²

^{1,2} Bauman Moscow State Technical University,
Russia 105005, Moscow, 2nd Baumanskaya str., 5 b.1

DEVELOPMENT OF THE METHOD OF CONTACT HEAT CONDUCTION MANAGEMENT WITH APPLICATION OF SPECIFIED ROUGHNESS PROFILES

СЕКЦИЯ 6

Прикладные задачи тепломассообмена

И.О. Тепляков, Д.А. Виноградов

Объединенный институт высоких температур РАН,
Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13 стр.2

ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА ИНИЦИИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ

В электрометаллургических агрегатах, предназначенных для выплавки металлов электродуговым или электрошлаковым способом, взаимодействие протекающего через расплав электрического тока с генерируемым им магнитным полем (МП) приводит к возникновению электромагнитных сил, приводящим к разнообразным магнитогидродинамическим (МГД) эффектам [1]. В данной работе исследуются специфические физические явления, обусловленные МГД-процессами в системах с полусферической конфигурацией.

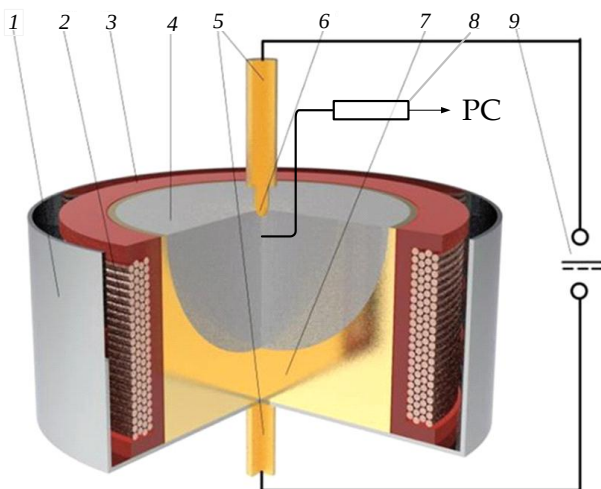


Рис. 1. Экспериментальная установка. 1 - охлаждающая ванна, 2 - соленоид, 3 - катушка, 4 - In-Ga-Sn, 5 токоподводы, 6 - малый электрод, 7 - большой электрод, 8 - термопарный зонд, 9 - источник питания.

В отсутствие внешнего магнитного поля в объеме жидкого металла устанавливается одиночный торoidalный вихрь. При воздействии внешнего вертикального магнитного поля возникает азимутальная сила приводящая металл к закрутке. Азимутальная закрутка вызывает возникновение вторичного, противоположно направленного торoidalного вихря. Тип гидродина-

мического режима системы, одно или двухвихревой, определяется соотношением между током протекающим через систему и внешним магнитным полем. При этом, взаимодействие двух вихрей может создавать в системе автоколебания. Если в системе создан достаточный градиент температур, автоколебания осевой скорости течения приводят к характерным пульсациям температуры. Исследуя эти пульсации можно определить гидродинамический режим. Были проведены эксперименты и построена карта режимов течения в координатах ток – внешнее магнитное поле.

Движение проводящей среды в магнитном поле приводит к возникновению индуцированного тока пропорционального проводимости, скорости и полю. При значениях тока достигаемых на нашей экспериментальной установке (до 1500 А) влияние индуцированного тока на осевую скорость крайне мало, но как было сказано выше, внешнее вертикальное магнитное поле создает азимутальную закрутку течения и увеличение внешнего поля приводит к усилению этой закрутки. При этом взаимодействие азимутальной скорости с внешним полем приводит к возникновению тормозящей электромагнитной силы, причем тормозящая сила растет квадратично ($F_{\text{торм}} \sim B_{\text{ext}}^2$), что приводит к существенному замедлению азимутальной скорости. Эффект замедления наблюдался в наших экспериментах на эвтектическом сплаве индий-галлий-олово, в расчетах получено, что он сильнее проявляется на металлах с большей проводимостью.

Еще один интересный эффект связан с тем, что возникающая полоидальная сила (вызывающая основное электровихревое течение), а также заставляет металл отжиматься от электрода, вызывая т.н. «пинч-эффект». Данный эффект был исследован на нашей экспериментальной установке на трех различных металлах, использовался эвтектический сплав индий-галлий-олово, сплав Вуда и ртуть. Также создана математическая модель и проведены численные расчеты деформации поверхности.

Список литературы

1. В.В. Бояревич, Я.Ж. Фрейнберг, Е.И. Шиловых [и др.] под ред. Э.В.Щербина. Электровихревые течения. Рига: Зинатне. 1985. с. 315.

I.O.Teplyakov, D.A.Vinogradov

Joint Institute for High Temperatures RAS,
Russia 125412, Moscow, Izhorskaya, 13 bldg.2

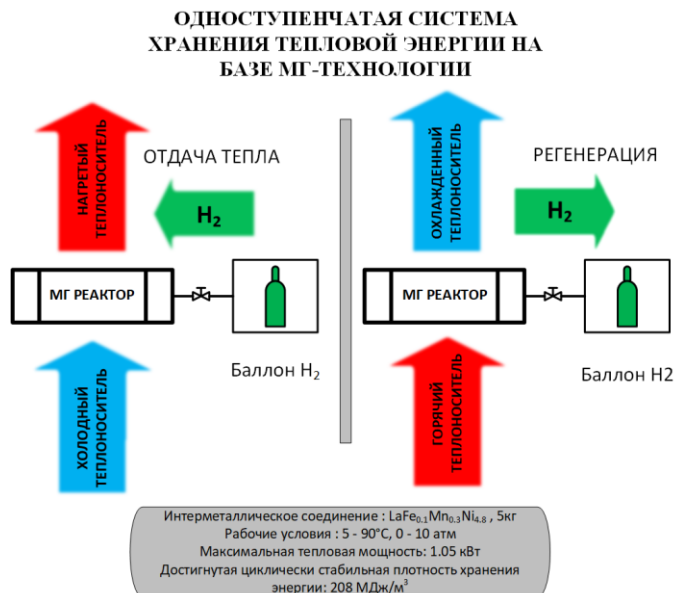
LIQUID METAL FLOWS INITIATED BY ELECTRIC CURRENT

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

¹ Объединенный институт высоких температур РАН,
111116, Москва, Красноказарменная, 17А

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

ОДНОСТУПЕНЧАТАЯ СИСТЕМА ХРАНЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ НА БАЗЕ МГ-ТЕХНОЛОГИИ



Эффективное использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) приобретает всё больший приоритет в мировом развитии энергетики и системы накопления энергии стали решением, обеспечивающим стабильность работы энергосистем на базе ВИЭ. Металлогидриды (МГ) могут быть использованы как для хранения и очистки водорода, так и для хранения тепловой энергии (ХТЭ). Мы представляем результаты экспериментальных исследований тепло- и массообмена а также динамики процессов в одноступенчатой системе хранения тепловой энергии на базе МГ-технологии, основанной на металлогидридном реакторе с 5 кг сплава $LaNi_{4.8}Mn_{0.3}Fe_{0.1}$. Продемонстрирована циклически стабильная работа установки в диапазоне температур 20-90°C с

объемной плотностью хранения энергии 208 МДж/м³ и максимальной тепловой мощностью 1.05 кВт. Характеристики системы анализировались с точки зрения энергетической и эксергетической эффективности. Основными препятствиями являются тепловые потери на нагрев корпуса реактора и необходимость использования легкого и эффективного теплообменника. Кроме того, скорость потока теплоносителя в обменнике должна поддерживаться достаточно низкой для обеспечения минимально возможной разницы между температурами засыпки МГ и теплоносителя. Оптимизированные низкотемпературные металлогидридные системы ХТЭ могут применяться в случаях, в которых необходимо нивелировать особенности климата и температуры окружающей среды, например в качестве предпусковых подогревателей ДВС или систем поддержания температуры.

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

Список литературы

1. **Kenisarin, M.M.**, High-temperature phase change materials for thermal energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010. 14(3): p. 955-970.
2. **Б.Д. Бабаев.** ПРИНЦИПЫ ТЕПЛООВОГО АККУМУЛИРОВАНИЯ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ // ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР, 2014, том 52, № 5, с. 760–776
3. **Reiser A, Begdavonic B, Schliche K.** The application of Mg based metal hydrides as heat energy storage systems. *Int J Hydrogen Energy* 2000; 25:425e30
4. **Borzenko, V.I., et al.**, Hydrogen sorption properties of metal hydride beds: Effect of internal stresses caused by reactor geometry. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019. 44(12): p. 6086-6092.

A.V. Bezudny¹, D.O.Dunikov^{1,2}, D.V.Blinov^{1,2}

¹ Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences,
Russia, 111116 Moscow, Krasnokazarmennaya, 17A

²Moscow Power Engineering Institute (MPEI)
Russia, 111250 Moscow, Krasnokazarmennaya 14

METAL-HYDRIDE BASED SINGLE-STAGE THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEM

А.С. Гриненко¹, А.В. Ненарокомов¹, Д.Л. Ревизников¹, И.А. Николичев¹

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

АЭРОТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ТЕПЛОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОГО КОРАБЛЯ ДЛЯ МАНЕВРИРОВАНИЯ В АТМОСФЕРЕ

Целью данной работы является разработка методики оптимального проектирования тепловой защиты космического корабля для безопасного движения (маневрирования) в атмосфере.

Для достижения поставленной цели требуется совместно решить комплекс задач баллистики, аэродинамики и аэротермодинамики, оптимального управления и теплового проектирования, необходимо выполнение требуемых ограничений по нагреву, перегрузкам, точности приведения к заданной конечной траектории движения и положению на ней, то есть ставится задача междисциплинарного оптимального проектирования.

Предполагается, что проектируемое покрытие эксплуатируется в условиях вакуума и газовой среды верхних слоёв атмосферы. Таким образом, необходимо моделирование радиационно-конвективно-кондуктивного теплообмена для решения задачи проектирования и оптимизации тепловой защиты.

В настоящей работе для оценки тепловых нагрузок в окрестности передней критической точки использовались аппроксимационные зависимости.

Для расчета плотностей конвективного и радиационного тепловых потоков такие зависимости обычно строятся в мультипликативном виде [1].

Аэродинамика аппарата моделировалась на основе зависимостей, представленных в [2]. Эти зависимости справедливы для аппарата, выполненного по схеме «несущий фюзеляж». Аэродинамическое качество аппарата изменяется в зависимости от угла атаки для выбранной формы несущего фюзеляжа.

Управление движением космического корабля осуществлялось по каналу тангажа. Существует ограничение диапазона изменения угла атаки. Траекторная проблема рассматривалась с точки зрения оптимизационной. Для её решения использовался непрямой метод вариационной группы – принцип максимума [3].

Рассматривается двухслойное теплозащитное покрытие, состоящее из комбинации различных материалов. Предполагается, что процесс распространения тепла в покрытии является одномерным по пространственной ко-

ординате и описывается уравнением теплопроводности [4]. Тепловой поток, подводимый к внешней границе, нестационарный.

На внешней границе задано граничное условие II рода. На внутренней границе – граничное условие I рода

На внешней границе учитывается тепловой поток, излучаемый нагретой поверхностью покрытия. На внутренней границе располагается адиабатическая стенка.

Для определения проектных параметров двухслойного теплозащитного покрытия в данной работе использовалась вычислительная схема метод спроектированного лагранжиана [5, 6, 7].

Для апробации разработанной методики был произведён численный эксперимент. В результате проведённого численного эксперимента реализовано оптимальное управление космическим кораблём, синтезирована его траектория движения, определены его оптимальные аэродинамические и аэротермодинамические параметры, спроектирована оптимальная теплозащита из комбинации различных материалов.

Список литературы

1. Brandis A.M., Johnston C.O. Characterization of stagnation-point heat flux for Earth entry, AIAA, 2014, 2014-2374, 20 p. <https://doi.org/10.2514/6.2014-2374>
2. Kosenkova A.V., Minenko V.E. Investigation of Aerodynamic Characteristics for Various Types of a Lander to the Venus Surface AIP Conference Proceedings 2318, 020006 (2021); <https://doi.org/10.1063/5.0035836>
3. Алексеев В. М., Тихомиров В. М., Фомин С. В. Оптимальное управление. М.: Наука, 1979, 432 с.
4. Авдеевский В.С., Кошкин В.К., Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике, М.:Машиностроение, 1992.
5. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация: Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 509 с.
6. Nenarokomov A.V. Design of a System of Multilayer Heat Insulation of Minimum Mass // High Temperature, 1997. – Vol. 35. – P. 453-457.
7. Nenarokomov A.V., Salosina M.O., Alifanov O.M. Optimal design of multi-layer thermal protection of variable thickness // International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 2017. – Vol. 27, Issue 5. – P. 1040 – 1055. doi: 10.1108/HFF-03-2016-0112.

A.S. Grinenko ¹, A.V. Nenarokomov ¹, D.L. Reviznikov ¹, I.A. Nikolichev ¹

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

AEROTHERMODYNAMIC ANALYSIS AND THERMAL DESIGN OF A SPACECRAFT FOR ATMOSPHERIC MANEUVERING

ТРУБА ЛЕОНТЬЕВА

В докладе изложен принцип работы и способы повышения эффективности устройства для безмашинного энергоразделения (температурного разделения) газового потока, предложенного Леонтьевым А.И. – труба Леонтьева (ТЛ) [1-2]. В таком устройстве поток разделяется на холодный и горячий (с температурой торможения меньше и больше начальной).

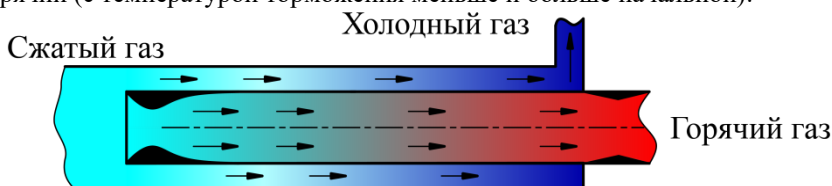


Рис.1 Схема «трубы Леонтьева»

Перераспределение температуры торможения происходит только за счет газодинамических процессов, происходящих внутри потока, т.е. поток не совершает технической работы и не участвует в теплообмене с окружающей средой. Поэтому ТЛ не содержит частей, приводимых в движение газом (лопаток, поршней и т.п.). Оно просто, надежно, не требует системы смазки и малоинерционно. Однако имеет более низкую эффективность по сравнению с обычными (машинными) способами получения горячих и холодных потоков, требующих сложных устройств и механизмов, таких как компрессоры, турбины, детандеры и т.п.

В трубе Леонтьева, внутренние каналы спрофилированы таким образом, что начальный поток газа разделяется на два потока – сверхзвуковой и дозвуковой. Между собой потоки разделены теплопроводной перегородкой. Температура поверхности перегородки со стороны дозвукового потока близка к начальной температуре торможения, а со стороны сверхзвукового потока – ниже начальной. Из-за образовавшейся разности температур возникает тепловой поток от дозвукового потока к сверхзвуковому. В результате на выходе из устройства сверхзвуковой поток имеет более высокую температуру торможения, а дозвуковой поток более низкую, при этом давление в дозвуковом потоке практически сохраняется, что является одним из пре-

^(*) А.Г. Здитовец, zditovets@mail.ru

имущества ТЛ по сравнению с другими устройствами безмашинного энерго-разделения потока. На эффективность энергоразделения в ТЛ влияют многие факторы, такие как теплофизические параметры рабочего тела (число Прандтля) [3], рельеф поверхности, обтекаемой сверхзвуковым потоком, фактор аналогии Рейнольдса, наличие скачков уплотнения и отрывов пограничного слоя [4], вдув/отсос через поверхность разделяющую потоки [5], [6], наличие конденсирующихся компонент [7].

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

Список литературы

1. Леонтьев А.И. Температурная стратификация сверхзвукового газового потока // Доклады Академии наук. 1997. № 4(354). С. 475–477.
2. Leontiev A.I., Zditovets A.G., Vinogradov Y.A., Strongin M.M., Kiselev N.A. Experimental investigation of the machine-free method of temperature separation of air flows based on the energy separation effect in a compressible boundary layer // Experimental Thermal and Fluid Science. 2017. (88). С. 202–219. DOI:10.1016/j.expthermflusci.2017.05.021.
3. Макаров М.С. Газодинамическая температурная стратификация в сверхзвуковых потоках. Дисс. канд. физ.-мат. наук. ИТ СО РАН. Новосибирск: , 2007. 154 с.
4. Vinogradov Y.A., Zditovets A.G., Leontiev A.I., Popovich S.S., Strongin M.M. Experimental research of shock wave processes influence on machineless gas flow energy separation effect // Journal of Physics: Conference Series. 2017. № 1(891). DOI:10.1088/1742-6596/891/1/012080.
5. Leontiev A.I., Zditovets A.G., Kiselev N.A., Vinogradov Y.A., Strongin M.M. Experimental investigation of energy (temperature) separation of a high-velocity air flow in a cylindrical channel with a permeable wall // Experimental Thermal and Fluid Science. 2019. (105). С. 206–215. DOI:10.1016/j.expthermflusci.2019.04.002.
6. Khazov D.E., Leontiev A.I., Zditovets A.G., Kiselev N.A., Vinogradov Y.A. Energy separation in a channel with permeable wall // Energy. 2022. № xxxx(239). С. 122427. DOI:10.1016/j.energy.2021.122427.
7. Zditovets A.G., Kiselev N., Vinogradov Y.A., Popovich S. Adiabatic wall temperature in the supersonic flow of moist air with spontaneous condensation // Experimental Thermal and Fluid Science. 2024. № September 2023(150). С. 111057. DOI:10.1016/j.expthermflusci.2023.111057.

A.G. Zditovets,

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

LEONTIEV TUBE

А.А. Мошин^{1,2}, Б.Г. Покусаев^{1,2}, И.Ю. Голованов², Д.П. Храмцов¹,

И.А. Михайлова³

¹ МИРЭА – Российский технологический университет,
Россия, 119454, Москва, пр. Вернадского, д. 78

² Московский политехнический университет,
Россия, 107023, Москва, ул. Большая Семеновская, д. 38

³ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Россия, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АППАРАТУРНОГО ОФОРМЛЕНИЯ ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ГИДРОГЕЛЯХ С МИКРООРГАНИЗМАМИ

В последние годы стремительно развивается регенеративная медицина и ключевую роль в этом процессе играют новые материалы. Особое внимание уделяется гидрогелям, которые позволяют создавать благоприятные условия для культивирования различных клеточных культур с возможностью контроля их свойств. Совершенствование аппаратного оформления культивирования клеток – актуальная задача современной промышленности.

Основной задачей при культивировании клеток микроорганизмов является получение большого объема готового продукта с живыми микроорганизмами. При этом, с точки зрения происходящих при культивировании микроорганизмов процессов, биореактор – это тепло- и массообменный аппарат. Таким образом, энерго- и ресурсосбережение процесса культивирования в биореакторе связано с интенсивностью процессов тепло- и массообмена, которые зависят от конструктивных параметров биореактора, и в первую очередь – от элементов жизнеобеспечения. Следовательно, перспективным направлением в совершенствовании аппаратного оформления культивирования клеток является разработка биореакторов с элементами жизнеобеспечения, улучшающими показатели энергосбережения и ресурсосбережения процесса культивирования. Исследования [1,2] показали высокую интенсивность тепло- и массообмена в биореакторе с фитилями в качестве элементов жизнеобеспечения [3].

Дальнейшие исследования позволили разработать конструкцию биореактора [4], обеспечивающего лучшие показатели энерго- и ресурсосбережения процесса культивирования за счет наличия установленных в корпусе 1 газоанализаторов 19 для оценки уровня составляющих газовой смеси и оценки уровня метаболитов в объеме гидрогеля, а также снабжения барботера 11 редуктором с расходомером 20, позволяющим регулировать и управ-

лять количеством подаваемой газовой смеси и, следовательно, позволяющим управлять ее растворенным в воде количеством (рис. 1).

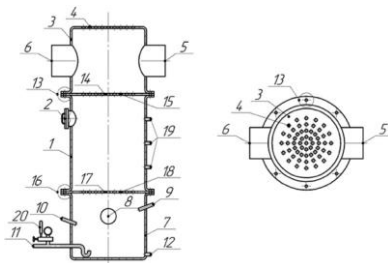


Рис. 1. Конструкция биореактора по патенту РФ 229942

Конструкция разработанного биореактора позволяет обеспечить высокий метаболизм иммобилизованных в рабочей среде клеток микроорганизмов эффективным подводом газовой смеси к клеткам и отвода их метаболитов во всем объеме рабочей среды.

Список литературы

1. Покусаев Б.Г., Вязьмин А.В., Захаров Н.С., Храмцов Д.П., Некрасов Д.А. Нестационарный массоперенос питательных веществ в гелях с каналами различной пространственной структуры // Теоретические основы химической технологии, 2020. - Т. 54. № 2. - С. 163-175.
2. Pokusaev B., Zakharov N., Vyazmin A., Nekrasov D., Volkova E., Moshin A. Study of hydrogel materials thermophysical properties // Thermal Science. – 2023. - Vol. 27, No. 5A. - P. 3701-3708.
3. Вязьмин А.В., Шумова Н.В., Лагуткин М.Г., Голованов И.Ю. Аппарат для объемного культивирования клеток № 2023103519: заявл. 15.02.2023; опубл. 20.07.2023 // Патент на полезную модель № 219502 U1 Российская Федерация.
4. Мошин А.А., Покусаев Б.Г., Храмцов Д.П., Некрасов Д.А., Голованов И.Ю. Аппарат для объемного культивирования клеток № 2024127926: заявл. 22.09.2024; опубл. 06.11.2024 // Патент на полезную модель № 229942 U1 Российская Федерация.

A.A. Moshin^{1,2}, B.G. Pokusaev^{1,2}, I.Yu. Golovanov², D.P. Khrantsov¹,

I.A. Mikhailova³

¹ MIREA - Russian Technological University,
Russia, 119454 Moscow, pr. Verdanskogo, 78

² Moscow Polytechnic University,
Russia 107023 Moscow, st. Bolshaya Semenovskaya, 38

³ National Research University «MPEI»,
Russia 111250 Moscow, st. Krasnokazarmennaya, 14

**IMPROVEMENT OF THE HARDWARE DESIGN OF HEAT AND
MASS TRANSFER PROCESSES IN HYDROGELS WITH
MICROORGANISMS**

А.В. Чукалин¹, В.Н. Ковальногов¹

¹ Ульяновский государственный технический университет,
Ульяновск 432027, ул. Северный Венец, д.32 (•)

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ТУРБУЛЕНТНОМ СЛЕДЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Введение. Разработка подходов к имитационному моделированию ветроэнергетических установок обосновывается возможностью существенного снижения вычислительных затрат и, как следствие, оперативного решения ёмких задач, связанных с прогнозированием режимов работы и проектированием ветропарков. Наряду с практическим преимуществом возникает искажение искомых результатов, связанных с упрощением модели. Разработка подходов для имитационного моделирования ближнего и дальнего турбулентных следов ветроэнергетических установок, включающих в себя методику моделирования вихревых структур, является основой корректного описания обменных процессов, каскадного переноса энергии и диссипации.

Проблематика и актуальность исследований.

Важным этапом в проектировании ветроэлектростанций является эффективная расстановка ветроэнергетических установок с целью достижения высокого коэффициента использования установленных мощностей (КИУМ). Отмечается, что средние потери мощности крупных ветроэлектростанций составляют от 5 до 20%, образующиеся из-за наложения турбулентных следов от впереди стоящих ветротурбин [1]. В ряде случаев при выделении площадок под строительство ветропарков есть ограничения по размещению ветроэнергетических установок, связанные с землепользованием. Важно отметить, что ряд регионов России, имеющих большой ветропотенциал, обладают сложными метеоусловиями с нерегулярным профилем скорости ветра, частыми переходами температурного режима «через ноль» и сопутствующими осадками, препятствующие работе ветроэнергетических установок (ВЭУ) в оптимальных режимах [2]. Исходя из масштабов ветроэлектростанций, индивидуальности площадок, а также метеорологических и климатических условий, разработка подходов к проектированию, основанных на математическом моделировании, является актуальной задачей.

Имитационное моделирование ветротурбин и исследование обменных процессов в турбулентном следе ветроэнергетических установок.

(•) А.В. Чукалин Chukalin.andrej

Важным обстоятельством для решения задач в масштабе крупных ветроэлектростанций является развитие подходов к имитационному моделированию ветротурбин, обеспечивающие описание образования и развития вихревых структур на лопастях ветротурбин. Предложен подход к имитационному моделированию ветротурбин с горизонтальной осью вращения, основанный на актуаторном линейном представлении (ALM) вращающихся частей рабочего колеса ветротурбины, используя ограниченный набор данных (диаметр ротора, скорость воздушного потока и значение коэффициента тяги ветроколеса). Основываясь на теоретических и практических данных по образованию и развитию вихревых структур, полученных Окуловым В.Л., Sørensen J.N., Andersen S.J., Kock, C.W. и др., разработаны методы описания образования корневых и концевых вихрей на лопастях ветротурбин. Реализованные методики позволяют значительно снизить время вычислений в сочетании с возможностями детализированного описания вихреобразования в ближнем и дальнем следе. На (Рис.1) представлены результаты расчета распределения температуры в следе одиночной ветроэнергетической установки с использованием разработанного подхода к моделированию вихревых структур.

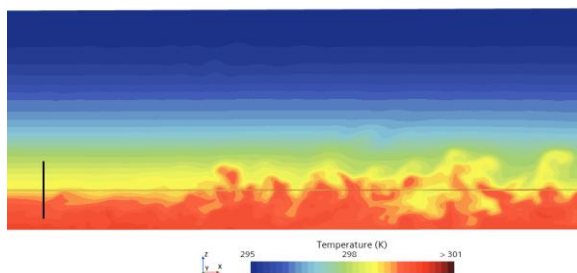


Рис.1. Картина течения неустойчивого атмосферного пограничного слоя в области ветроэнергетической установки

Список литературы

1. Porté-Agel, F., Bastankhah, M., & Shamsoddin, S. (2019). Wind-Turbine and Wind-Farm Flows: A Review. *Boundary-Layer Meteorology*, 174(1), 1–59.
2. Kudelin, A.; Kutcherov, V. Wind ENERGY in Russia: The current state and development trends. *Energy Strategy Rev.* 2021, 34, 100627.

A.V. Chukalin ¹, V.N. Kovalnogov ¹

¹ Ulyanovsk State Technical University,
Ulyanovsk 432027, Severny Venets St., 32

MODELING AND STUDY OF EXCHANGE PROCESSES IN THE TURBULENT WAKE OF WIND TURBINES

А. А. Котляр¹, С. В. Веретенников¹, Е. Г. Колесова², О. А. Евдокимов¹,

¹Рыбинский государственный авиационный технический
университет имени П. А. Соловьева,

Россия, 152934, Рыбинск, ул. Пушкина, 53

²ПАО «ОДК-Сатурн»,

Россия, 152903, Ярославская область, г. Рыбинск, пр. Ленина, 163

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ШАГА МЕЖДУ ОТВЕРСТИЯМИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГАЗОВОЙ ЗАВЕСЫ

Технология заградительного охлаждения [1] широко используется для обеспечения потребной температуры лопаток первых ступеней турбины высокого давления. За рубежом, в настоящий момент, для подвода охладителя активно используются отверстия сложной геометрической формы [2]. В отечественной практике до настоящего времени, как правило, по всей поверхности пера лопатки изготавливаются только отверстия цилиндрического типа. Согласно исследованиям, отверстия с расширяющейся частью позволяют обеспечить более надежную тепловую защиту поверхности.

Наибольшее распространение на практике, за счет простоты изготовления, получили веерные [3] и скошенные отверстия с различной длиной диффузорного участка. Применение данных форм отверстий позволяет обеспечить наиболее широкую площадь защищаемой поверхности за счет растекания струи и меньшего проникновения в ядро основного потока. В связи с чем возникает необходимость проведения исследований влияния относительного шага между соседними струями, для определения наиболее удачной расположения отверстий различного типа по перу лопатки для обеспечения высокой тепловой защиты.

Таким образом, в данной работе представлены результаты экспериментального исследования влияния относительного шага между отверстиями цилиндрической формы, веерной с длинной расширяющегося участка 1 и 3 калибра в плоском канале при изменении параметра вдува от m от 0,5 до 1,5. Диаметр цилиндрической части каждого отверстия был равен 5 мм. Шаг между отверстиями варьировался от 4 до 6 калибров. Испытательный объект был изготовлен из PLA пластика методом 3D прототипирования.

Экспериментальное исследование выполнялось двумя методами. Для определения аддиабатической эффективности охлаждения использовался метод ИК термографирования. Было получено, что за отверстием цилиндрической формы при $m > 1$ эффективность охлаждения $\eta \approx 0,01$, что свидетельствует об отрыве газовой завесы от защищаемой поверхности. Осредненная

по поверхности эффективность веерных отверстий с длинным диффузорным участком на 66% выше эффективности веерных отверстий с коротким диффузорным участком при относительном шаге между отверстиями $Z/D=4$ калибра. С увеличением шага между отверстиями эффективность охлаждения веерных отверстий с коротким диффузорным участком снижается на 76%, для веерного отверстия с длинным диффузорным участком снижается на 42%.

С целью определения структуры течения и взаимодействия струй охладителя, выраженного в подмешивание потока одной струи в ядро другой струи, за отверстиями различной формы. Исследование выполнялось методом PIV (цифровая трассерная визуализация). За отверстием цилиндрической и веерной формируются почкообразные вихревые структуры и происходит подмешивание основного потока к защищаемой поверхности. За отверстием веерной формы с длинным диффузорным участком, формирование данных вихревых структур не происходит, соседние струи взаимодействуют между собой при удалении до $Z/d=6$ калибров и $m>1$.

Таким образом, применение веерных отверстий с длинным диффузорным участком позволяет организовать наибольшую тепловую защиту охлаждаемой поверхности при Z/d до 6 калибров и тем самым сократить количество отверстий, для подвода охлаждающего воздуха по перу лопатки, и снизить расход охладителя.

Список литературы

1. Локай, В.И. Теплопередача в охлаждаемых деталях газотурбинных двигателей летательных аппаратов [Текст] / В.И. Локай, М.Н. Бодунов, В.В. Жуйков, А.В. Щукин. - М.: Машиностроение, 1985, -216с.
2. Bunker, Ronald S. «Film Cooling: Breaking the Limits of Diffusion Shaped Holes». Heat Transfer Research, т. 41, вып. 6, 2010 г., сс. 627–50. <https://doi.org/10.1615/HeatTransRes.v41.i6.40>.
3. S. Kim, D. Lee, Y.S. Kang, D.-H. Rhee, Experimental Study on the Improvement of Film Cooling Effectiveness of Various Modified Configurations Based on a Fan-Shaped Film Cooling Hole on an Endwall, Energies 16 (2023) 7733. <https://doi.org/10.3390/en16237733>.

A. A.Kotlyar¹, S. V. Veretennikov¹, E.G. Kolesova², O.A.Evdokimov¹

¹ P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University,
Russia 152934, Rybinsk, Pushkin St., 53

²PJSC "UEC-Saturn",
Russia, 152903, Yaroslavl region, Rybinsk, Lenin Ave., 163

STUDIES OF THE EFFECT OF THE RELATIVE PITCH BETWEEN OPENINGS ON THE EFFECTIVENESS OF A GAS CURTAIN

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Россия, 195251, Санкт-Петербург, Политехническая, д.29 литера Б
Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН
Россия, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В АКУСТИЧЕСКОМ ДВИГАТЕЛЕ СТИРЛИНГА

Тема акустического двигателя Стирлинга, как простого в конструкции и надежного устройства с внешним подводом тепла, остается актуальной в современных условиях. Такие устройства представляют особый интерес благодаря отсутствию большого количества движущихся частей, что значительно повышает их ресурс. Актуальность исследований обусловлена широким спектром потенциальных применений, включая аэрокосмическую отрасль [1], где требуется эффективное использование тепловой энергии в условиях ограниченных ресурсов, а также энергетическую сферу [2], где важны технологии утилизации низкопотенциального тепла.

В данной работе представлена математическая модель акустического двигателя Стирлинга. Устройство состоит из горячего и холодного теплообменников, регенератора, акустического резонатора и подвижного поршня. Моделирование регенератора выполняется путем задания облака тяжелых твердых частиц. Неинтенсивное колебательное движение газа в течение короткого временного интервала не приводит к существенному разлету частиц, что позволяет описать сопротивление каркаса регенератора и реализовать двухтемпературную модель теплообмена. Согласно схеме на рис. 1, по обе стороны от регенератора расположены, соответственно, горячий и холодный теплообменники. Теплообменники моделируются как пористые тела с заданной теплопроводностью и проницаемостью. В плоской постановке, на

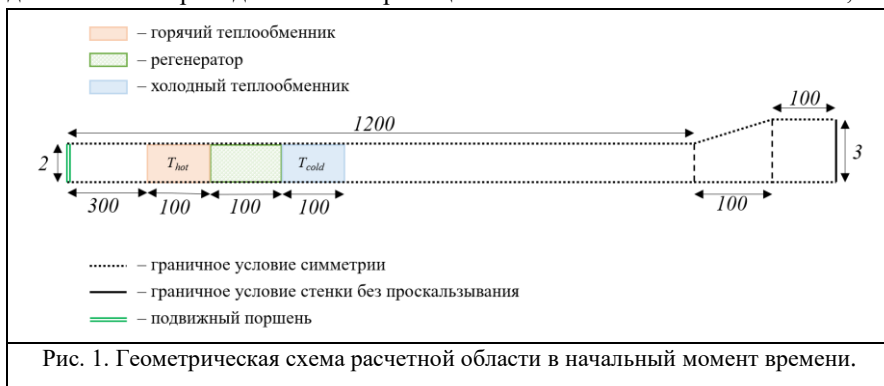


Рис. 1. Геометрическая схема расчетной области в начальный момент времени.

верхней и нижней границах расчетной области заданы условия симметрии.

Решение задачи было получено в рамках численного интегрирования системы уравнений Навье-Стокса в двумерной нестационарной постановке. Осредненные по Рейнольдсу уравнения решались для ламинарного режима течения. Уравнение теплопроводности решалось с учетом теплопередачи между газом, горячим и холодным теплообменниками, частицами регенератора и стенками. Динамика поршня описывалась вторым законом Ньютона, где суммарная сила включает силу сопротивления от воздействия линейного генератора и перепад давления по обе стороны поршня. Закон его движения реализован через пользовательскую функцию (UDF). Геометрическая схема расчетной области в начальный момент времени представлена на рисунке 1. Для аппроксимации производных по времени и пространству использованы схемы второго порядка. Решение получено на структурированной расчетной сетке, с переменным количеством элементов, насчитывающей порядка $7 \cdot 10^4$ ячеек. Численное моделирование выполнено при помощи программного пакета ANSYS Fluent.

Список литературы

1. Backhaus S., Tward E., Petach M. Thermoacoustic Power Systems for Space Applications // American Institute of Physics. 2002. – V. 608 (1). – P. 939–944. DOI: doi: 10.1063/1.1449822
2. Zhanghua W., Wei D., Man M., Ercang L. A solar-powered traveling-wave thermoacoustic electricity generator // Sol. Energy. 2012. Vol. 86. P. 2376–2382. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.05.010>

A.A. Vasilev, S.V. Bulovich

Peter The Great Saint-Petersburg Polytechnic University,
Russia 195251 Saint-Petersburg, Politekhnikeskaya, 29
The Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences,
Russia 194021, Saint-Petersburg, Politekhnikeskaya, 26

NUMERICAL SIMULATION OF PROCESSES IN A THERMOACOUSTIC STIRLING ENGINE

А. Р. Григорьев¹, М. В. Мурашов²

^{1,2} МГТУ им. Н. Э. Баумана

Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5 стр. 1

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ КОНТАКТНОЙ ПРОВОДИМОСТИ ТВЁРДЫХ ТЕЛ В ВАКУУМЕ

Любой технический объект содержит большое количество элементов, контактирующих друг с другом. В статичных конструкциях, подвижных механизмах, электрических устройствах множество свойств конечного изделия зависит от контактных взаимодействий между элементами. Зачастую именно контакты являются источниками массогабаритных ограничений для конечного продукта, от микроэлектроники до конструкционных сооружений[1]. Для улучшения свойств контактной тепло- и электропроводности различных материалов предпринимаются множество различных технических решений от промежуточных связующих веществ до создания искусственной шероховатости. Однако процессы, происходящие в месте контакта, в настоящее время слабо поддаются численной оценке[2]. Ещё более трудной задачей является проектирование контактов, удовлетворяющих заданным требованиям.

Для разработки математических моделей, нацеленных на описание свойств контактного взаимодействия, требуется надёжный источник экспериментальных данных, пригодный для проверки и совершенствования расчётных моделей. В настоящее время приборы для измерения тепловой контактной проводимости используют преимущественно стационарные методы и проводят измерения при нормальных условиях[3]. Установки, способные получать данные о свойствах контактов при повышенном давлении, а также в условиях безвоздушной среды или среды инертных газов, представлены в единичных экземплярах[4] и не являются легкодоступными для исследований. Однако именно такие измерения необходимы, в частности, для авиакосмической и радиоэлектронной промышленности. Разработка новых методов измерения контактных свойств материалов и создание экспериментальных установок даст возможность получения более доступных экспериментальных данных для верификации математических моделей.

Разрабатываемая установка предназначена для определения тепловой контактной проводимости при температурах до 300 °С и контактных давлениях до 20 МПа на образцах, помещённых в вакуум. Схема измерительной установки представлена на рисунке 1.

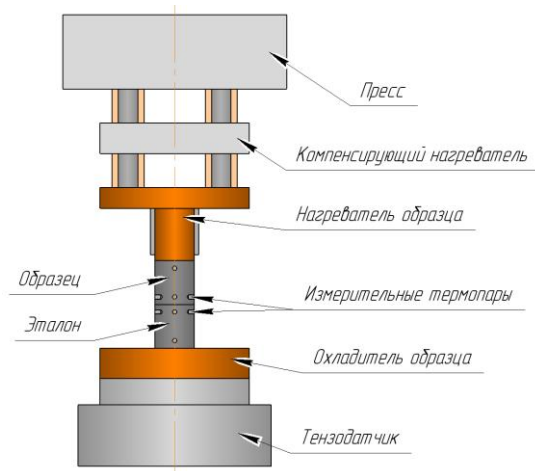


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

С учётом количественных требований к проводимым экспериментам и свойств исследуемых материалов, были произведены расчёты параметров установки, таких как: мощность нагревателя и холодильника, мощность привода, параметры винтовой передачи и т.д.

Установка позволит производить испытания не только металлических конструкционных материалов, но и высокотемпературных углерод-углеродных композиционных материалов, широко используемых в авиакосмической промышленности.

Список литературы

1. Попов В.М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. Москва: Энергия, 1971. 216 с.
2. Шлыков Ю.П., Ганин Е.А., Царевский С.Н. Контактное термическое сопротивление. Москва: Энергия, 1977. 328 с.
3. Мурашов М.В. Тепловой контакт шероховатых металлических тел // Материалы Восьмой Российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 17—22 октября 2022 г.). Т.2. М.: Издательство МЭИ, 2022. С.209-210.
4. Experimental study on thermal contact resistance of carbon fiber reinforced silicon carbide composite with 3D needled preform (3DN C/SiC) / X.-J. Ren, H. Ding, Y.-J. Dai et al. // International Communications in Heat and Mass Transfer, 2021. Vol.124, 105271.

A. R.Grigoriev¹, M.V. Murashov²

^{1,2} Bauman Moscow State Technical University,
Russia 105005, Moscow, 2nd Baumanskaya str., 5 b.1

DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED CONTACT THERMAL CONDUCTIVITY MEASUREMENT SYSTEM WITH SOLIDS IN VACUUM

ТЕРМОФЛОТАЦИОННОЕ ВСПЛЫТИЕ ЧАСТИЦ ПОЛИДИСПЕРСНОЙ ЗАСЫПКИ В НЕДОГРЕТОЙ ЖИДКОСТИ

Исследование процесса всплытия мелкодисперсных частиц в жидкостях вызывает как научный, так и практический интерес. Особого внимания заслуживает явление всплытия частиц в недогретых жидкостях, где температурные эффекты могут сильно влиять на динамику процесса. Одной из практических областей такого интереса являются новые технологии для разделения частиц различных материалов. Это важно для оптимизации процессов очистки, фильтрации и сепарации в химической, нефтегазовой, пищевой и других отраслях промышленности.

Для отделения твёрдых частиц часто применяют химические вещества, однако это приводит к загрязнению среды. Поэтому разрабатываются методы всплывания без использования реагентов. Цель исследования — изучить поведение частиц разных материалов в недогретых жидкостях без изменения их свойств. Учитываются размер, форма, плотность частиц и характеристики жидкости, а также температурные градиенты. Подразумевается изучение трёхфазной системы (жидкость, газ и твёрдое тело). Эта система имеет важное значение для науки, так как позволяет лучше понять процессы на границе раздела фаз.

В исследовании применялся экспериментальный стенд с нагревателем для нагрева рабочей жидкости. Рабочая жидкость располагалась в емкости, выполненной из термостойкого стекла, которая обеспечивала устойчивость и удобство наблюдения. Блок термопар, установленных на дне ёмкости и на поверхности жидкости на расстоянии 2 см, позволял проводить точные измерения перепада температур вдоль высоты столба жидкости.

На графике (рис.1) представлены изменения температуры двух термопар. Температурный поток помогает комплексу подниматься со дна, однако при подъёме происходит охлаждение, что приводит к его опусканию обратно. Также исследование выявило, что с ростом нагрузки повышается чувствительность изменения размера газового пузыря к перепадам температуры. Таким образом, процесс подъёма и опускания комплекса повторяется снова и снова, создавая динамическое равновесие между тепловым потоком и охлаждением.

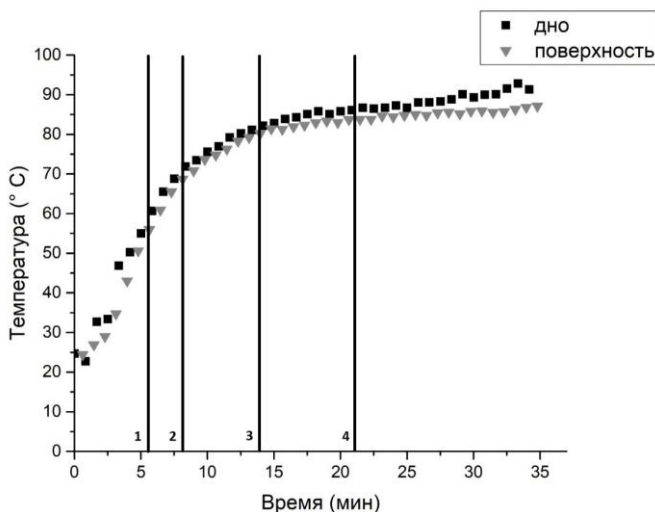


Рис. 1. График изменения температур двух термопар при нагреве емкости с этапами: 1 — начало образования пузырей; 2 — начало отрыва первых комплексов; 3 — начало отрыва средних комплексов; 4 — начало отрыва больших комплексов;

Работа включает теоретические подходы к моделированию и экспериментальные данные. Результаты исследования оптимизируют процессы разделения и контроля поведения частиц в жидкостях с переменной температурой без реагентов и с минимальным загрязнением среды.

Список литературы

1. Дмитриев А.С., Введение в нанотеплофизику, М.: БИНОМ, 2015;
2. Эльбуз Мустафа Али. Исследование процессов тепломассообмена при испарении и кипении в простых и мезоскопических системах монодисперсных микросфер и мезотрубок: Издательство МЭИ, 2015;
3. Ксенофонтов Б. С. Флотационная обработка воды, отходов и почвы, М.: Новые технологии, 2010
4. Ксенофонтов, Б. С. Очистка воды и почвы флотацией, / Б. С. Ксенофонтов. - М.: Новые технологии, 2004. .

A. P. Shmatkov, P. G. Makarov

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

HEAT INDUCE FLOATING OF PARTICLES OF POLYDISPERSE BACKFILL IN A UNDERHEATED LIQUID

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ КЛАССИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ О ПЕРЕКРЕСТНОТОЧНОМ ОДНОХОДОВОМ ПЛАСТИНЧАТОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ

Распределение температур при чисто перекрестном токе в одноходовом пластинчатом теплообменнике получено Нуссельтом и независимо от него Анцелиусом в виде рядов [1] для обычных теплоносителей. Другой вид решения предложен Шуманом [2] в виде конечных соотношений для «горячего» и «холодного» теплоносителей с использованием функций Бесселя мнимого аргумента нулевого порядка, а в [3] это решение получено в измененной форме с помощью модифицированной функции Бесселя 1-го рода действительного аргумента нулевого порядка.

В случае охлаждения тепловыделяющей жидкости исходная формулировка классической задачи принимает вид:

$$\frac{\partial T_1(X, Y)}{\partial Y} = -[T_1(X, Y) - T_2(X, Y)] + Q; \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_2(X, Y)}{\partial X} = T_1(X, Y) - T_2(X, Y); \quad (2)$$

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

где $X, Y, T_{1,2}$ – безразмерные независимые и зависимые параметры, определённые в [1]; $Q = \text{const}$ – относительный источник теплоты в «горячем» теплоносителе.

Применение одностороннего интегрального преобразования Лапласа переводит систему (1) – (3) в изображения:

$$T_1^{(L)}(s, Y) = \frac{1}{s} \left\{ \exp\left(-\frac{s}{1+s}Y\right) + Q \frac{1+s}{s} \left[1 - \exp\left(-\frac{s}{1+s}Y\right) \right] \right\}; \quad (4)$$

$$T_2^{(L)}(s, Y) = \frac{1}{s} \left\{ \frac{1}{1+s} \exp\left(-\frac{s}{1+s}Y\right) + \frac{Q}{s} \left[1 - \exp\left(-\frac{s}{1+s}Y\right) \right] \right\}, \quad (5)$$

где $s, T_{1,2}^{(L)}$ – изображения $X, T_{1,2}$.

Оригинал (4) и (5) имеет вид:

$$T_1(X, Y) = 1 + QY - \int_0^Y \Phi(X, Y, \xi) dY; \quad (6)$$

$$T_2(X, Y) = \int_0^X \Phi(X, Y, \xi) dX, \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} \Phi(X, Y, \xi) = & I_0(2\sqrt{XY}) \exp[-(X+Y)] + \\ & + Q \int_0^X [\delta(\xi) - 1] \{ \exp[-(X-\xi)] - \\ & - I_0[2\sqrt{(X+\xi)Y}] \exp[-(X-Y-\xi)] \} d\xi, \end{aligned}$$

$\delta(\xi)$ - функция Дирака.

Заметим, что при $Q = 0$ решении (6) и (7) приобретает вид решения Шюмана.

Список литературы

1. Хаузен Х. Теплопередача при противотоке, прямотоке и перекрестном токе. – М.: Энергоиздат, 1988. – 384с
2. Филин Н.В., Буланов А.Б. Жидкостные криогенные системы. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 247с.
3. Sangsawang R., Matum T., Nontakaew U. Analytical solution for the temperature distribution in cross-flow plate heat exchanger channels of isosceles triangular geometry // Mechanical Engineering: An International Journal (MEU). – 2014. – V.1. – №2. – p.1-10.

V.I. Ryazhskikh, A.A. Krasnov

Voronezh State Technical University,
Russia, 394006, Voronezh, 20th of October St., 84

ANALYTICAL SOLUTION OF THE CLASSICAL PROBLEM OF A CROSS-FLOW SINGLE-PASS PLATE HEAT EXCHANGER FOR COOLING A HEAT-GENERATING LIQUID

Д.К. Попова¹, Н.Н. Кортиков¹

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОХЛАЖДАЕМОЙ СТУПЕНИ ТУРБИНЫ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ГАРМОНИЧЕСКОГО БАЛАНСА

Нестационарный характер присущ потоку газа в турбомашинах. Основными источниками нестационарности в ступени турбины являются: дозвуковое потенциальное взаимодействие, взаимодействие ударных волн и взаимодействие следа, а также температурная неравномерность на выходе камеры сгорания [1]. Проведение нестационарных исследований на экспериментальных стендах достаточно дорого. С появлением вычислительных методов моделирования турбулентности класса URANS стоимость численного эксперимента оказывается на порядок ниже натурного. Для нестационарного расчета проточной части газогенератора, содержащей ступень турбины с системой подвода охлаждаителя (рис.1.) И заданием натурного распределения температуры на выходе камеры сгорания, потребовалось около 19 миллионов контрольных объемов расчетной сетки, при этом использовалось 4 вычислительных узла кластера с 32 вычислительными ядрами.

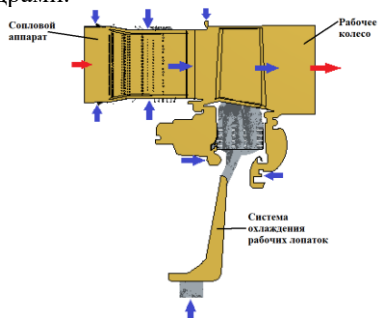


Рис. 1. Общий вид расчетной области (синий цвет – параметры охлаждающего, красный – параметры газа)

В настоящее время существует два подхода снижения времени расчета: во-первых - это увеличение вычислительных ресурсов для решения данного класса задач; и, во-вторых, - это применение новых подходов к их численному решению. В работе рассматривается перспективный вариант численного решения рассматриваемого класса задач, основанный на методе гармонического

ческого баланса (НВ) и встроенный в пакет STAR-CCM + [2]. Этот метод обеспечивает приближенное решение нестационарных задач при существенном уменьшении объема вычислений. Главным условием успешного применения метода НВ является, во-первых, обоснование правомерности перехода от реального количества лопаток в венце рабочего колеса к одному межлопаточному каналу с применением условий периодичности; во - вторых, определение количества мод для адекватного описания переноса нестационарных возмущений в проточной части ступени. На рис. 2. показано влияние числа мод на распределения скорости в окружном направлении.

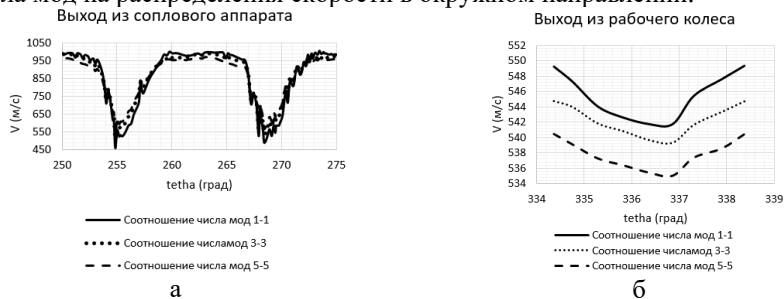


Рис. 2. Распределение скорости в окружном направлении на выходе из соплового аппарата (а) и на выходе рабочего колеса (б)

Таким образом, показана приемлемая точность НВ-метода для расчета регулярных колебаний потока в осевом зазоре и на выходе рабочего колеса двигателя семейства РД33. Такой вывод сделан на основе сравнения результатов расчета с опытными данными и результатами численного моделирования, в котором применялся URANS подход и метод скользящих сеток.

Список литературы.

1. Августиневич В.Г., Шмотин Ю.Н. Численное моделирование нестационарных явлений в газотурбинных двигателях. - М.: Машиностроение, 2005. 536 с.
2. Григорьев А.В., Якунин А.И., Кузнецов Н.Б., Кондратьев В.Ф., Кортиков Н.Н. Расчет нестационарного ротор-статор взаимодействия в турбинной ступени методом гармонического баланса. Научно - технические ведомости. СПбГПУ. 2013. № 1 (166). С.183-191.

D.K. Popova¹, N. N. Kortikov¹

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnical University,
Russia 195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29

SIMULATION OF UNSTEADY PROCESSES IN THE COOLED TURBINE STAGE BASED ON THE HARMONIC BALANCE METHOD

Д.Ю. Балакин¹, К.Э. Аронсон¹

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, д. 19

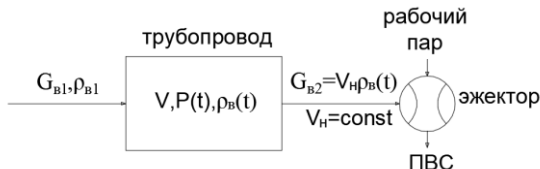
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПАРОСТРУЙНОГО ЭЖЕКТОРА ПРИ РАБОТЕ НА СУХОМ ВОЗДУХЕ

Испытания пароструйного эжектора на сухом воздухе позволяют оценить его техническое состояние и получить зависимость давления в ступенях от расхода впускаемого воздуха [1].

Авторами разработан портативный измерительный комплекс, который позволяет регистрировать давление с периодичностью в 1 секунду и таким образом получить характеристику переходного процесса в эжекторе [2].

Моделирование такого переходного процесса представляет существенный интерес для эксплуатационного персонала. Необходимо отметить, что в литературе [3] встречаются модели переходных процессов в цилиндре турбины, но модель переходного процесса для эжектора отсутствует.

Схематично динамическая модель работы эжектора на сухом воздухе представлена на рисунке 1.



$G_{в1}, G_{в2}$ — расходы воздуха на входе и выходе системы, V — объем трубопровода, V_n — объемная производительность эжектора (постоянна), P — давление на всасе эжектора, $\rho_{в1}$, — плотность воздуха в начале переходного процесса, $\rho_{в}$ — плотность воздуха в ходе переходного процесса

Рис 1. Схема динамической модели работы эжектора на сухом воздухе

Используя уравнение состояния идеального газа можно записать однородное линейное дифференциальное уравнение:

$$\frac{dP(t)}{dt} + \frac{V_n}{V_T} P(t) - \frac{V_n \rho_{в1} R_g T_g}{V_T} = 0$$

Решением уравнения является зависимость давления на всасе эжектора от времени:

$$P(t) = \frac{P_0 - \rho_{e1} R_g T_g}{\frac{V_H t}{V_T}} + \rho_{e1} R_g T_g$$

где P_0 – давление, с которого начинается переходный процесс.

На рисунке 2 представлен смоделированный и экспериментальный переходный процесс.

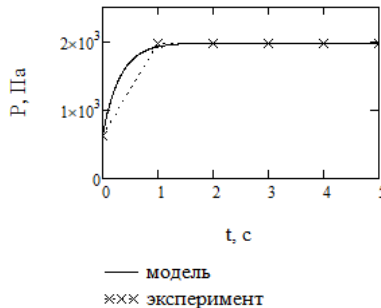


Рис 2. Смоделированный и экспериментальный переходный процесс

Смоделированный переходный процесс совпадает с экспериментальным по форме и времени выхода на стационарный режим.

Список литературы

1. РД 34.30.302-87 Методические указания по наладке и эксплуатации пароструйных эжекторов конденсационных установок турбин ТЭС и АС/А.И. Белевич // М.: Минэнерго СССР, 1990. 34 с.
2. Аронсон К.Э. Влияние присосов воздуха на динамические характеристики системы конденсатор – эжектор паротурбинной установки. / К.Э. Аронсон, А. Ю. Рябчиков, Д. В. Брезгин, Д. Ю. Балакин, Н. В. Желонкин, А. Л. Демидов//Теплоэнергетика, 2025, № 2. С. 12-18.
3. Автоматическое регулирование паровых турбин и газотурбинных установок/И. И. Кириллов Л.: Машиностроение. 1988. – 447 с.

D.Yu. Balakin¹, K.E. Aronson¹

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin,
Russia 620062, Ekaterinburg, 19 Mira street.

MODELING THE DYNAMICS OF A STEAM-JET EJECTOR DURING DRY AIR SUCTION

Д.В. Блинов^{1,2}, Бездудный А.В.¹, Д.О. Дуников^{1,2}, А.А. Еронин¹

¹ Объединенный институт высоких температур РАН,
111116, Москва, Красноказарменная, 17А

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

УСТАНОВКА ДЛЯ ТВЕРДОФАЗНОГО ОБРАТИМОГО ХРАНЕНИЯ ВОДОРОДА В ГИДРИДАХ МЕТАЛЛОВ

Металлогидридные технологии твердофазного хранения водорода позволяют решить проблемы безопасного, компактного и долговременного аккумулирования водорода [1]. Цель настоящей работы заключается в разработке и создании эффективных систем твердофазного обратимого хранения водорода с максимальным рабочим давлением не более 1 МПа.

Одним из основных препятствий перед широким распространением металлогидридных систем твердофазного аккумулирования водорода является проблема тепломассопереноса [2]. Поглощение водорода происходит с выделением значительного количества тепловой энергии, например, для интерметаллида LaNi_5 теплота реакции равна 30 кДж/моль H_2 (1.3 МДж/норм.м³), что составляет 12.5% от низшей теплоты сгорания водорода. При этом засыпка поглощающего материала обычно находится в устройстве в виде мелкодисперсного порошка, состоящего из частиц размером порядка 1-10 мкм с низкой эффективной теплопроводностью (порядка 1 Вт/м К). В результате взаимодействия с водородом засыпка перегревается, и реакция останавливается, поскольку с ростом температуры экспоненциально возрастает и равновесное давление, определяемое по уравнению Вант-Гоффа. Более того, равновесное давление также зависит от концентрации водорода и начинает резко возрастать, после фазового превращения твердого раствора водорода в металлогидрид, что дополнительно замедляет реакцию поглощения водорода [2, 3].

Решение проблемы интенсификации тепломассопереноса в металлогидридных устройствах твердофазного хранения водорода является одним из наиболее актуальных направлений исследований [4]. В нашем случае особенности конструкции определялись по результатам математического моделирования. Трубчатый тип конструкции металлогидридных реакторов на основе металлогидридных патронов (Рис.1), содержащих охлаждаемую жидкостью герметичную камеру, обеспечивает хороший теплообмен за счет увеличенной площади контакта засыпки со стенкой теплообменника.

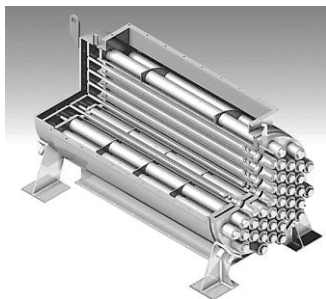


Рис.1. Конструкция металлгидридного реактора твердофазного обратимого хранения водорода.

В ходе исследований изготовлены и исследованы образцы водородоглощающих материалов.

Выполнено математическое моделирование работы реактора, заполненного выбранным сплавом $\text{LaNi}_{4.8}\text{Al}_{0.2}$.

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

Список литературы

1. M.V. Lototsky, B.P. Tarasov, V.A. Yartys, "Gas-phase applications of metal hydrides", Journal of Energy Storage, 2023, vol. 72 (D), 108165.
2. D.O. Dunikov, V.I. Borzenko, "Heat and mass transfer crisis in a metal hydride accumulator", Journal of Physics: Conference Series, 2020, vol. 1683, 052018.
3. K.B. Minko, V.I. Artemov, G.G. Yan'kov, "Numerical simulation of sorption/desorption processes in metal-hydride systems for hydrogen storage and purification. Part I: Development of a mathematical model, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, Vol. 68, P. 683-692.
4. V. Kudiyarov, R. Elman, N. Pushilina, N. Kurdyumov, "State of the Art in Development of Heat Exchanger Geometry Optimization and Different Storage Bed Designs of a Metal Hydride Reactor", Materials, 2023, vol. 16, 4891.

D.V. Blinov^{1,2}, A.V. Bezdudny¹, D.O. Dunikov^{1,2}, A.A. Eronin¹

¹ Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Russia, 111116 Moscow, Krasnokazarmennaya, 17A

²Moscow Power Engineering Institute (MPEI)
Russia, 111250 Moscow, Krasnokazarmennaya 14

INSTALLATION FOR SOLID STATE REVERSIBLE STORAGE OF HYDROGEN IN METAL HYDRIDES

Д.О. Дуников^{1,2}, Д.В. Блинов^{1,2}, Б.С. Серов²

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

²Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Россия, 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1

ОЧИСТКА ВОДОРОДА ИЗ ПРИРОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ С ПОМОЩЬЮ МЕТАЛЛОГИДРИДОВ

Водород рассматривается в качестве универсального вторичного энергоносителя, который будет применяться для декарбонизации энергетики. Ежегодно в мире производится более 90 млн.т водорода, однако, практически полностью за счет использования ископаемых топлив. Предполагается, что для снижения углеродного следа, водород будет получаться за счет ВИЭ путем электролиза воды. Однако, поступление энергии солнца и ветра переменного по времени, что существенно снижает конкурентоспособность электролиза воды по сравнению с паровой конверсией метана и другими термохимическими методами. Таким образом, вовлечение в оборот новых источников водорода, отличающихся постоянным по времени поступлением, является важной и актуальной задачей, стоящей перед мировой и российской энергетикой.

Она может быть решена за счет природных источников водорода, среди которых можно выделить биомассу и геохимические процессы, протекающие в земной коре. Ресурсы биомассы Земли огромны, их использование позволит производить водорода в необходимых для трансформации энергетики количествах. Начиная с 2000-х гг. у исследователей появился интерес к новому направлению – биологическому производству водорода. Многие микроорганизмы производят водород в цикле своей жизнедеятельности, большим преимуществом этого подхода является возможность получения водорода из органических отходов [1]. Другим постоянным источником водорода может стать его поступление из земных недр. Различные геохимические процессы (термохимические, биологические и т.д.) приводят к появлению и выходу водорода на поверхность [2]. Хорошо известно, что в природном газе обычно содержится некоторое количество водорода. Плюсом использования природного водорода является возможность использования развитой инфраструктуры добычи природного газа.

В то же время, у природных источников водорода есть несколько заметных недостатков, основным из которых является низкая плотность их распространения и малое содержание водорода в получаемых газовых смесях. В настоящее время не существует эффективных и доступных методов извлечения водорода из смесей природного происхождения. Коммерческие технологии

(адсорбционные, мембранные и криогенные) очистки водорода разработаны для выделения водорода из смесей с повышенным его содержанием (более 70%) и работают при давлениях выше 1 МПа.

Решить эту проблему можно за счет веществ, селективно поглощающих водород даже при низких давлениях, например, металлгидридов [3]. Очистка, компрессия и хранение водорода в виде обратимых гидридов металлов является наиболее безопасным и компактным вариантом и отличается высокой объемной плотностью хранения, также гидриды металлов обладают потенциалом для хранения и тепловой энергии. В ОИВТ РАН разработаны водородопоглощающие материалы с низкими равновесными давлениями абсорбции водорода и металлгидридные реакторы, позволяющие эффективно выделять водород из смесей с CH_4 и CO_2 , при малых содержаниях H_2 , что характерно для природных источников.

Выполнен цикл исследований по изучению образцов водорода природного происхождения. Исследовано получение биоводорода в том числе и при повышенных до 1 МПа давлениях с концентрацией водорода до 10-15%. На предоставленном ООО «Газпром водород» образце концентрата природного газа с Ковыктинского месторождения, содержащего 4% водорода, успешно продемонстрирована возможность очистки водорода. Исследованы вопросы отравления поверхности металлгидридов соединениями серы, содержащимися в природном газе, отработана методика регенерации «отравленного» серой металлгидрида.

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

Список литературы

1. Kamshybayeva G.K., Kossalbayev B.D., Sadvakasova A.K., Zayadan B.K., Bozieva A.M., Dunikov D., Alwasel S., Allakhverdiev S.I. Strategies and economic feasibilities in cyanobacterial hydrogen production // International Journal of Hydrogen Energy. 2022. Т. 47. № 69. — С. 29661-29684.
2. Zgonnik V. The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review // Earth-Science Reviews. 2020. Т. 203. — 103140.
3. Lototsky M.V., Tarasov B.P., Yartys V.A. Gas-phase applications of metal hydrides // Journal of Energy Storage. 2023. — С. 108165.

D.O Dunikov^{1,2}, D.V. Blinov^{1,2}, B.S. Serov²

¹ Joint Institute for High Temperatures RAS,
Russia 125412, Moscow, Izhorskaya, 13 bld. 2

² National Research University “MPEI”,
Russia 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya, 14 bld.12

PURIFICATION OF HYDROGEN FROM NATURAL SOURCES BY METAL HYDRIDES

Д.С. Смирнов^{1,2}, С.В. Веретенников¹, В.П. Крупин²

¹ Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева,

Россия, 152934, Рыбинск, ул. Пушкина, 53

² Публичное акционерное общество «ОДК-Сатурн»,
Россия 152903, Рыбинск, пр. Ленина, 163

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕПЛООБМЕНА В СЛАБОВЕНТИЛИРУЕМЫХ ВРАЩАЮЩИХСЯ ПОЛОСТЯХ РОТОРА КВД С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕТЕЧЕК ВОЗДУХА

Аннотация. Представлены расчеты подогрева проходящего потока воздуха в компрессоре.

Ключевые слова: Подогрев воздуха, КВД, свободная конвекция, перетечки воздуха.

Повышение давления в компрессоре ГТУ, особенно в авиационном ГТД, где перепад давлений π может превышать 50:1, требует уменьшения размеров лопаток и установки правильного радиального зазора между ротором и статором. Для расчета радиального зазора необходимо рассчитать радиальное расширение дисков компрессора, что в свою очередь, требует расчета теплопередачи внутри закрытой полости между вращающимися дисками. Также является необходимым расчет подогрева транзитного потока, поскольку он оказывает влияние на тепловое состояние диска ТВД.

Течение, вызванное свободной конвекцией, возникающее внутри полостей ротора КВД, является трехмерным, нестационарным и неустойчивым, и расчет этих воздушных потоков с использованием вычислительной гидродинамики (CFD) является очень дорогостоящим и обычно неточным.

В литературе присутствуют различные зависимости для расчета процесса сопряженного теплообмена в полостях ротора КВД, по которым была установлена достаточно высокая сходимость. Однако использовать их по отдельности не является возможным. В связи с этим на основе трех критериальных уравнений была разработана методика аналитического расчета, которая включает в себя расчет подогрева воздуха в полостях ротора компрессора

$$Nu_{пол} = 0,4(Re^2 + Gr)^{0,25}; [1]$$

$$Nu_{ступ} = 0,69Re_{ступ}^{0,37}; [2,3]$$

$$Nu_{обод} = 0,44(Ra_{обод})^{0,25}; [2,3]$$

Выполнен аналитический расчет теплообмена в междисковых полостях ротора КВД двигателя ПД-8. Рассмотрен ряд уравнений, в результате были отобраны наиболее подходящие (диапазон применимости которых позволяет применить их к рассматриваемой геометрии).

На основе трех критериальных уравнений из зарубежной литературы разработан алгоритм расчета, для внедрения в программное обеспечение ПАО ОДК «Сатурн».

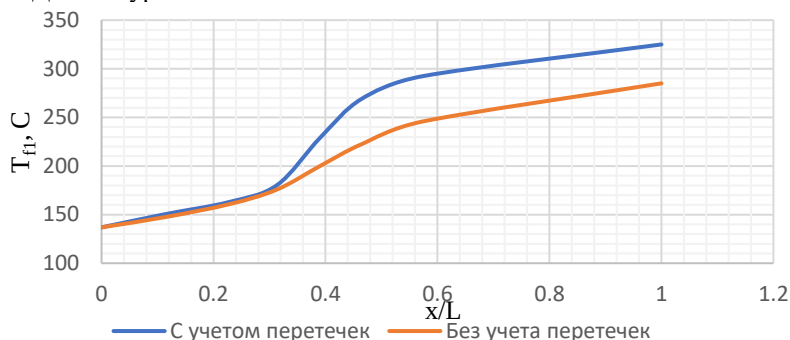


Рис. 1. Зависимость температуры проходящего потока от приведенной длины КВД

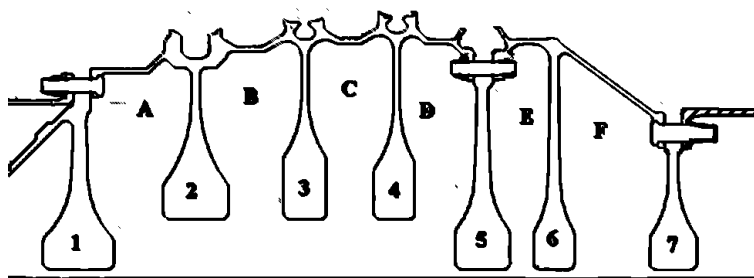


Рис. 2. Обозначения для полостей и дисков ротора КВД

Список литературы

1. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров / Х. Уонг / Пер. с англ. Справочник. – М.: Атомиздат, 1979. – 216 с.
2. Tang, H.; Owen, J.M. Effect of buoyancy-induced rotating flow on temperature of compressor discs. J. Eng. Gas Turbines Power 2017, 139, 062506.
3. Tang, H.; Puttock, M.; Owen, J.M. Buoyancy-induced flow and heat transfer in compressor rotors. J. Eng. Gas Turbines Power 2017, in press.

D.S. Smirnov^{1,2}, S.V. Veretennikov¹, V.P. Krupin²

¹ P. A. Solovoyov Rybinsk State Aviation Technical University,
Russia 152934, Rybinsk, Pushkin St., 53

² Public joint stock company «UEC-Saturn»
Russia 152903, Rybinsk, Lenin Avenue, 163

A METHOD FOR CALCULATING HEAT TRANSFER IN POORLY VENTILATED ROTATING CAVITIES OF A CVD ROTOR, TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF AIR OVERFLOWS

Д.С. Смирнов^{1,2}, С.В. Веретенников¹

¹ Рыбинский государственный авиационный технический
университет имени П. А. Соловьева,
Россия, 152934, Рыбинск, ул. Пушкина, 53

² Публичное акционерное общество «ОДК-Сатурн»,
Россия 152903, Рыбинск, пр-кт Ленина, 163

РАСЧЕТ СА ТВД ГТД СО ВСТРОЕННЫМИ ВИХРЕВЫМИ ТРУБАМИ

Аннотация. Представлены расчеты соплового аппарата 1 ступени газовой турбины. Продемонстрированы зависимости коэффициента охлаждения от приведенного расхода.

Ключевые слова: эффект Ранка-Хилша, коэффициент эффективности охлаждения, расходная характеристика, воздух, водяной пар

Повышение эффективности газотурбинных энергетических установок определяется уровнем температуры газов перед турбиной, который достигается за счет интенсификации теплообмена в системах охлаждения лопаток газовых турбин. В работе рассмотрена система охлаждения соплового аппарата 1 ступени газовой турбины с интегрированными вихревыми противоточными камерами, реализующими эффект Ранка-Хилша. В них интенсивно закрученный периферийный поток, перемещаясь от закручивающего устройства к дросселю, нагревается, охлаждая вогнутую и выпуклую поверхности пера лопатки, при этом он отбирает энергию у приосевого потока, перемещающегося в противоположном направлении. Выходя из диафрагмы вихревой камеры, поток со сниженной температурой подаётся на охлаждение входной и выходной кромок и выбрасывается в проточный тракт. Подогретый поток из вихревой камеры выбрасывается через перфорацию на спинке в корневом и периферийном сечениях. Выполнено численное моделирование сопряженной задачи газодинамики и теплообмена в модели лопатки при использовании в качестве охладителя воздуха и перегретого водяного пара. В результате расчетного исследования получена зависимость эффективности охлаждения пера лопатки от относительного расхода хладагента (для воздуха и водяного пара) при перепаде давления в системе охлаждения от 1,3 до 2,0. Выполнен расчет пропускной способности лопатки и построена расходная характеристика. Стоит отметить, что использование представленного соплового аппарата не допустимо при перепаде давления менее $\pi = 1,3$, так как система охлаждения работает неустойчиво и наблюдается локальное затекание газа из межлопаточного канала через отверстия перфорации. При значении относительного расхода 2,8% средняя эффективность охлаждения не превышает 0,2. При дальнейшем возрастании расхода до 5,6% происходит резкое увеличение средней

эффективности охлаждения более чем в два раза до 0,49 с последующей стабилизацией значения вблизи 0,6 при расходе охладителя более 8%. Аналогичные зависимости получены для перегретого водяного пара, при этом наблюдается увеличение средней эффективности охлаждения на 30-40% (см. рис. 1).

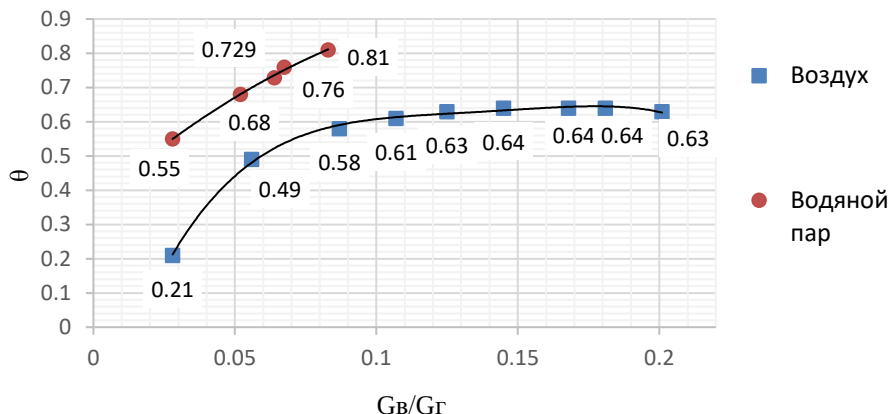


Рис. 1. Зависимость средней эффективности охлаждения пера лопатки от расхода хладагента (воздух, водяной пар)

Список литературы

1. Верхованцев, А. А. Газотурбинные установки. Часть 2: Конструкция ГТУ и их элементов: учебное пособие / А. А. Верхованцев, В. Г. Злобин. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2021. – 53 с.
2. Шве́ц И. Т. Воздушное охлаждение деталей газовых турбин [Текст] / Шве́ц И.Т., Дыбан Е.П. Киев: Наукова думка, 1974. – 488 с.
3. Каблов Е. Н. Высокоэффективное охлаждение лопаток горячего тракта ГТД [Текст] / Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Светлов И.Л. // Авиационные материалы и технологии. Учредители: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов НИЦ «Курчатовский институт». – 2017, М. – С. 3-14.

D.S. Smirnov^{1,2}, S.V. Veretennikov¹

¹ P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University,
Russia 152934, Rybinsk, Pushkin St., 53

² Public joint stock company «UEC-Saturn»
Russia 152903, Rybinsk, Lenin Avenue, 163

CALCULATION OF THE SA HPT GTE WITH INTEGRATED VORTEX TUBES

И.А. Борисенко¹, А.В. Нетелев¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»,

Россия, 125993, г. Москва, Волоколамское ш., д. 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА АККОМОДАЦИИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЛОБОВОГО ТОРМОЗНОГО ЭКРАНА С НАБЕГАЮЩИМ ПОТОКОМ

Представленный метод может быть использован для идентификации свойств набегающего потока газа при движении спускаемого аппарата в атмосфере планеты. В случаях затруднительности или невозможности прямых измерений для расчета характеристик потока могут быть использованы методики, основанные на обработке косвенных данных о тепловом состоянии лобового тормозного экрана. Такие методики базируются на решении обратных задач теплопереноса [1] В представленной работе для оценки коэффициента аккомодации в формуле Фея-Риддела [4,5] используется метод итерационной регуляризации для минимизации целевого функционала экспериментальных и расчетных температур.

Использование уравнения Фея-Риддела сопряжено с рядом трудностей. В частности, экспериментальное измерение коэффициента аккомодации крайне затруднено даже в лабораторных условиях.

Тепловое состояние системы пограничный слой - лобовой тормозной экран будет описываться совместным решением внешней и внутренней задач теплопереноса система.

С целью решения поставленных задач для получения граничного условия на внутренней границе экрана монтируется датчик теплового потока, а в качестве дополнительной информации используются показания термомпар, установленных во внутреннем объеме лобового тормозного экрана.

Использование одномерной модели было допустимо по причине многократного превышения радиуса затупления экрана над толщиной тепловой защиты. Граничное условие на внешней границе задается с использованием показаний датчика теплового потока [6].

В таком случае, расчет коэффициента аккомодации (из уравнения Фея-Риддела) будет являться классической обратной задачей. В силу некорректности обратных задач, для ее решения необходимо применять специальные методы, которые позволят получить устойчивое решение [2,3].

Для верификации методики расчета планируется использовать экспе-

риментальные данные, полученные на стенде конвективного нагрева в «Тепловой лаборатории НИО-601» МАИ [6]. Схема эксперимента представлена на Рис. 2

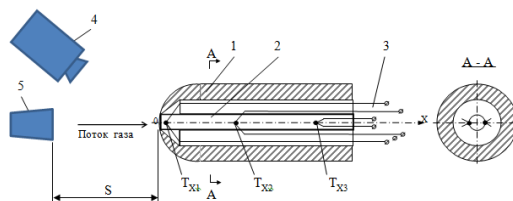


Рис. 1. Схема тепловых испытаний с датчиком теплового потока: 1 – корпус датчика, 2 – чувствительный элемент (ЧЭ), 3 – выводы термпар, 4 – тепловизионная камера, 5 – сопло источника нагрева, TX1, TX2, TX3 – термопары [6].

Планируется, что представленная в работе методика позволит производить вычисление коэффициента аккомодации лобовых тормозных экранов с достаточно высокой точностью, а ее верификация на данных реального эксперимента позволит доказать ее эффективность для расчета параметров перспективных изделий.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации по проекту FSFF-2025-0001.

Список литературы

1. Тихонов А.Н. О решении некорректно-поставленных задач и методе регуляризации. – ДАН СССР, 1963, т.151, N 3, с.501–504.
2. Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Румянцев С.В. Экстремальные методы решения некорректных задач и их приложения к обратным задачам теплообмена, М.: Наука, 1988, - 288с.
3. Алифанов О. М. Обратные задачи теплообмена./ М.: Машиностроение, 1988. – 280с.
4. Fay, J. A. and Riddell, F. R., “Theory of stagnation point heat transfer in dissociated air,” Journal of the Aeronautical Sciences, Vol. 25, No. 2, February 1958, pp. 73–85.
5. Martin, J.J., Atmospheric Entry: An Introduction to Its Science and Engineering, Old Tappan (New Jersey, United States): Prentice Hall, 1966
6. Ненарокомов А. В., Моржухина А. В., Будник С. А., Ревизников Д. Л., Неверова^{1,2} Д. А., Борисенко И. А. Определение характеристик переносных свойств газа по измерениям датчиков тепловых потоков. – Материалы XVII Минского международного форума по тепло- и массообмену, стр. 1044, Минск, 2024

I.A. Borisenko ¹, A.V. Netelev ¹

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

DETERMINATION OF THE COEFFICIENT OF ACCOMMODATION IN THE INTERACTION OF THE FRONTAL BRAKE SHIELD WITH THE INCOMING FLOW

ЧИСЛЕННОЕ И НАТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБОКОМПРЕССОРА ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

В основе работы лежит концепция создания цифровых двойников (DT – digital twin) - цифровых (численная) копий объекта, реализующих все процессы и явления в объекте и вокруг него.

На первом этапе проводилось сканирование деталей импульсного турбокомпрессора, реинжиниринг рабочей документации и формировалась CAD-модели деталей и проводилась виртуальная сборка турбокомпрессора (рис.1).



Рис. 1. Схема реализации проекта от прототипа до реинжиниринга конструкторской документации турбокомпрессора и виртуальной сборки

На втором этапе была предложена физико-математическая модель, включающая в себя дискретизированную конечно-объемными элементами расчетную область, нестационарные уравнения Навье–Стокса, для замыкания которых применялась $k-\omega$ модель переноса сдвиговых напряжений Ментера, уравнение неразрывности и уравнение энергии в формулировке для энтальпии, начальные и граничные условия, а также теплофизические свойства

воздуха в зависимости от температуры и давления. Расчетная область покрывалась конечно-объемной сеткой, состоящей из тетрагексагональных и гибридных элементов. На основе численного исследования течения в проточной части турбокомпрессора, термогазодинамического инженерного расчета, анализа напряженного состояния его узлов, были предложены изменения, повышающие эффективность турбокомпрессора, по сравнению с базовой конструкцией прототипа. По полученным результатам моделирования проводилась разработка конструкторской и технологической документации, проводились изготовление и сборка турбокомпрессора и его испытание на промышленном испытательном стенде (рис.2).



Рис. 2. Схема реализации проекта от CAD-модели турбокомпрессора до разработки технологической оснастки, изготовления, сборки и испытания турбокомпрессора

Результаты испытаний подтвердили расчетные рабочие характеристики турбокомпрессора с высокой точностью.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках Соглашения о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на оказание государственных услуг FZSU-2023-0004.

М.А.Кolesnikov, I.A.Popov

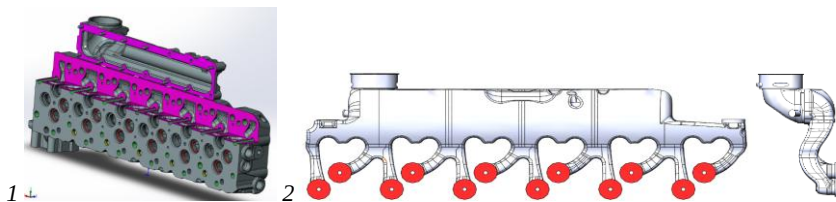
Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev - KAI,
Russia, 420111, Kazan, K.Marx St., 10

NUMERICAL AND FULL-SCALE MODELING OF A DIESEL ENGINE TURBOCHARGER

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВПУСКА ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Процессы наполнения свежим зарядом воздуха цилиндров поршневого двигателя определяются как совершенством процессов в системе впуска двигателя, так и фазами газораспределения, геометрией и размерами цилиндров и клапанных каналов каждого цилиндра, и относятся к процессам газообмена. Численное моделирование газодинамических процессов в системах впуска является актуальной задачей при проектировании новых образцов авиационных поршневых двигателей.

На первом этапе создания формировалась CAD-модель системы впуска воздуха (рис.1).



1 — в головке блока цилиндров; 2 — объема впускного коллектора

Рис. 1. CAD-модель впускного воздушного коллектора

На втором этапе была предложена физико-математическая модель, включающая в себя дискретизированную конечно-объемными элементами расчетную область, нестационарные уравнения Навье–Стокса, для замыкания которых применялась k - ω модель переноса сдвиговых напряжений Ментера, уравнение неразрывности и уравнение энергии в формулировке для энтальпии, начальные и граничные условия, а также теплофизические свойства воздуха в зависимости от температуры и давления. Расчетная область покрывалась конечно-объемной сеткой, состоящей из тетрагексагональных и гибридных элементов. Общая мощность сетки составляла порядка 14 млн пространственных ячеек. В качестве начальных и граничных условий для численных исследований использовались: на входе в расчетную область – зависимости температуры и массового расхода на входе в расчетную область

в зависимости от угла поворота коленчатого вала φ за полный цикл (720°) с шагом $0,5^\circ$ для трех режимов работы двигателя $n = 1100$ мин-1 (режим максимальных оборотов при холостом ходе), $n = 1400$ мин-1 (режим максимального крутящего момента) и $n = 2300$ мин-1 (режим максимальной мощности); на выходе из расчетной области – зависимости статического давления и температуры на выходе из расчетной области для каждого из 6 цилиндров в зависимости от угла поворота коленчатого вала за полный цикл (720°) с шагом $0,5^\circ$ для всех режимов работы двигателя. На стенках, контактирующих с теплоносителем, ставилось условие прилипания. Стенка предполагалась теплоизолированной, таким образом моделировалось «холодное течение» газа с учетом сжимаемости. Задавался закон открытия клапанов цилиндров 1-5-3-6-2-4.

Основным критерием эффективности системы впуска двигателя является равномерность распределения заряда свежего воздуха по цилиндрам двигателя. Для базового варианта системы впуска получена значительная неравномерность распределения зарядов, достигающая 26,67% для цилиндров 5 и 6 по сравнению с цилиндром 2. Предложено 4 варианта изменения геометрии впускного коллектора, не вносящих существенного изменения в номенклатуру деталей головки блока цилиндров, переделок навесного оборудования и подкапотного пространства.

Изменение конструкции входного устройства позволило снизить почти в 15 раз гидравлическое сопротивление и улучшить значение неравномерности до 8,56%.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках Соглашения о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на оказание государственных услуг FZSU-2023-0004.

Список литературы

1. Попов И.А., Жукова Ю.В., Гуреев В.М., Чорный А.Д., Попов-мл И. А. Численное моделирование системы впуска авиационных поршневых двигателей // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2024. Т.97, № 3. С.141-148.

K.I.Smirnov, I.A.Popov

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

NUMERICAL SIMULATION OF THE DIESEL ENGINE INTAKE SYSTEM

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ СМАЗКИ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Численное моделирование гидродинамических процессов в системах смазки является актуальной задачей при проектировании новых образцов дизельных двигателей. Бесперебойная циркуляция масла является неотъемлемой частью надежного функционирования двигателей.

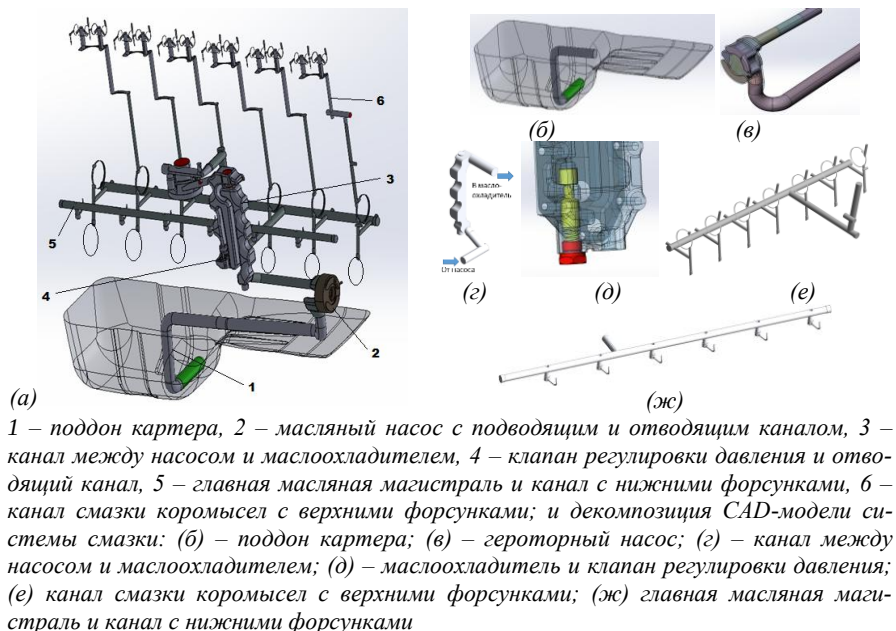


Рис. 1. CAD-модель системы смазки

На первом этапе создания формировалась CAD-модель системы смазки (рис.1). Общая CAD-модель системы смазки двигателя создавалась как набор CAD-моделей отдельных компонентов системы смазки. Сама по себе

система смазки не замкнута и имеет выход в атмосферу, а также в наличии имеется система подшипников с микронными зазорами, что делает невозможным полномасштабный расчёт системы смазки как единого целого.

В рассматриваемых случаях математическая модель описывает движение и теплообмен теплоносителя в каналах сложной формы системы смазки. В качестве уравнений, описывающих движение теплоносителя, используются осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса, стационарные, уравнение неразрывности и уравнение энергии в формулировке для энтальпии. Для описания турбулентности использовалась $k-\omega$ модель турбулентности Ментера. Особенностью моделирования было использование модели пористого тела для маслоохладителя. Конечно-объемная сетка насоса две вращающиеся расчётные области (твёрдую и жидкую). Так как перекрывающиеся элементы жидкости исключаются из расчёта, то на каждом временном шаге расчёта происходит перестроение расчетной сетки.

Сравнительный анализ показал, что отклонение расчетного значения расхода масла при использовании моторного масла SAE 15W40 от паспортного составляет 2,19-8,45 %.

По результатам серии расчетов были получены напорная характеристика героторного насоса, гидравлическая характеристика клапана регулировки давления масла, потери давления на всех напорных участках масляных магистралей. Предложены следующие технические решения по модернизации системы смазки: увеличение производительности насоса за счет линейного изменения рабочего объема насоса; предложено изменение геометрии штока клапана регулировки давления, связанное с уменьшением его длины со стороны масляного канала.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках Соглашения о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на оказание государственных услуг FZSU-2023-0004.

Список литературы

1. Попов И.А., Гуреев М.В., Гуреев В.М., Жукова Ю.В., Чорный А.Д. Численное моделирование системы смазки авиационных поршневых двигателей // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2024. № 1. С. 94-100.

I.A.Popov^{1,2}, I.A.Popov²

^{1 2} Kazan State Agricultural University,
Russia, 420111, Kazan, K.Marx St., 65

² Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev - KAI,
Russia, 420111, Kazan, K.Marx St., 10

NUMERICAL SIMULATION OF THE DIESEL ENGINE LUBRICATION SYSTEM

С.Л. Носков¹, Д.А. Генералов¹, И.И. Шепелев¹

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОЧИТСКЕ СТОЧНЫХ ВОД ТЭС

Загрязнение воды нефтепродуктами представляет серьезную угрозу для систем водоснабжения энергетических предприятий и близлежащих водоемов в виду малой ПДК. Нефтепродукты могут попадать в водоемы в эмульгированном, коллоидном и растворенном состоянии. Основными источниками загрязнений могут выступать маслосистемы турбин и подшипников, мазутное хозяйство, потери трансформаторного масла, автохозяйства.

Математическое моделирование процессов очистки сточных вод позволяет повышать эффективность системы очистки путем определения оптимальных размеров и конфигурации очистных сооружений, в частности нефтеловушек, определять оптимальные параметры, включая скорость потока, время пребывания, прогнозировать эффективность очистки при колебаниях температуры среды, расхода и концентрации загрязнителей [1,2]. Моделирование позволяет отрабатывать новые методы очистки, включая использование коагулянтов и флокулянтов, применение мембранных технологий, использование биологических методов очистки. Моделирование движения жидкости в резервуаре описывается уравнениями Навье-Стокса, которые численно решаются с помощью с использованием методов вычислительной гидродинамики (CFD) [3]. Для моделирования процессов очистки сточных вод была разработана модель работы нефтеловушки на языке C++. Параметры нефтеловушки: расход воды 0,5 м³/с; ширина нефтеловушки 2 м; начальная концентрация нефтепродуктов 100 мг/л.

На рис. 1 представлены результаты расчета нефтеловушки в виде зависимостей скорости осаждения частицы от ее размера и времени пребывания частицы от глубины ловушки. При расчетном времени пребывания воды в ловушке, достаточном для полного выделения частиц заданного размера из ламинарного потока, в реальных условиях остаточная концентрация их может быть определена по выражению:

$$C = C_0 e^{-1} \approx 0,368 C_0,$$

где C_0 – начальная концентрация частиц, мг/л; C – конечная концентрация частиц, мг/л.

В общем случае изменение концентрации частиц определяется выражением:

$$C = C_0 e^{-k \frac{W\tau}{H}},$$

где k – экспериментальный коэффициент, зависящий от интенсивности перемешивания воды; W – скорость движения частицы, м/с; τ – время пребывания частицы, с; H – глубина ловушки, м [4].

В настоящее время применяется значительное число вычислительных инструментов, позволяющих проводить моделирование, в частности для решения задач гидрогазодинамики применяются специализированные CFD-пакеты, которые позволяют визуализировать и анализировать результаты исследований. Среди таких программ можно выделить Ansys, Star-CCM+, OpenFOAM, FlowVision и другие.

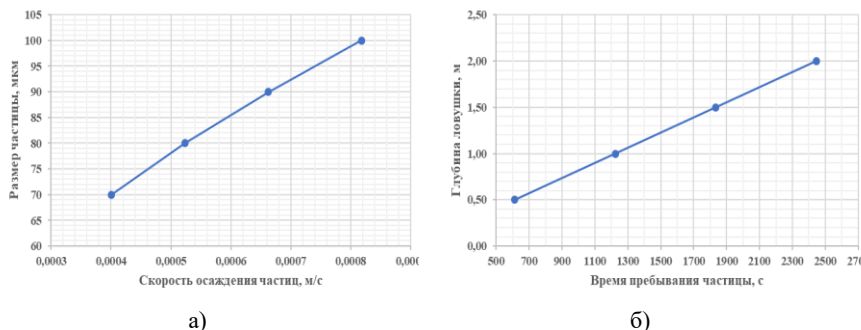


Рис. 1. Зависимость скорости осаждения частицы от ее размера (а) и времени пребывания частицы от глубины ловушки (б)

Список литературы

1. Зверева, Э. Р. Повышение технико-экономических показателей мазутных хозяйств / Э. Р. Зверева, А. Г. Лаптев, Л. В. Ганина // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2007. – № 11-12. – С. 12-18.
2. Сухинов А.И. и др. Комплекс моделей, явных регуляризованных схем повышенного порядка точности и программ для предсказательного моделирования последствий аварийного разлива нефтепродуктов // Параллельные вычислительные технологии. – 2016. – С. 308-319.
3. Angelim, Kelly & Lima, A & Souza, Josedite & Farias Neto, Severino & Oliveira, V. & Moreira, Gicelia. (2017). Applying CFD in the Analysis of Heavy Oil/Water Separation Process via Hydrocyclone. International Journal of Multiphysics. 11. 151-168. 10.21152/1750-9548.11.2.151.
4. Покровский В.Н., Аракчеев Е.П., Очистка сточных вод тепловых электростанций. – М.: Энергия, 1980. – 256 с.

S.L. Noskov¹, D.A. Generalov¹, I.I. Shepelev¹

¹ Ulyanovsk State Technical University,
Russia 432027, Ulyanovsk, st. Severny Venets, 32

**MODELING OF ENERGY-EFFICIENT PROCESSES IN
THERMAL POWER PLANT WASTEWATER TREATMENT**

В.И. Кузнецов¹, И.С. Антаненкова¹

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

КОЭФФИЦИЕНТЫ ТЕПЛОТДАЧИ ФРЕОНОВ ПРИ КОНДЕНСАЦИИ В КОЖУХОТРУБНЫХ АППАРАТАХ

Методика расчета кожухотрубного фреонового конденсатора с водным охлаждением достаточно подробно описана в работе [1]. Методом последовательных приближений определяется температурный напор между фреоном и наружной поверхностью трубки теплообменной поверхности, при котором выполняется равенство плотностей теплового потока при теплоотдаче конденсирующегося пара и тепловосприятии нагреваемой воды в стационарном режиме работы аппарата.

Верификация данной методики была выполнена на характеристиках кожухотрубных аппаратов марки КТР. В оребренных медных трубках аппаратов движется охлаждающая вода, а в межтрубном пространстве конденсируется фреон. Аппараты данной конструкции серийно выпускались в России в конце XX века для холодильных установок на веществе R12. В настоящее время они практически не производятся промышленностью, однако их конструктивное исполнение целесообразно рассматривать в качестве водоохлаждаемых конденсаторов для энергетических установок на низкокипящих рабочих веществах (фреонах), работающих по циклу Ренкина.

Сравнительный анализ характеристик процесса конденсации фреонов выполнялся для аппарата КТР-50, максимальная производительность которого достигает 173 кВт (по имеющимся данным, при температуре насыщения 30 °С). Согласно справочным данным, площадь действительной наружной поверхности аппарата составляет 49,6 м², длина трубы 2,5 м, диаметр обечайки 0,404 м, число труб 135, а число ходов по воде – 4. Достоверные параметры накатного оребрения, которое было использовано в каталогизированном оборудовании не известны, однако для верификации методики и дальнейших расчетов использовались следующие данные: внутренний диаметр трубы 13,2 мм, толщина трубы 1,65 мм, высота ребра 2,25 мм, шаг ребер 2 мм, толщина ребра у основания 1,72 мм, у вершины 0,3 мм. Сопротивление теплопередаче слоя загрязнений внутри труб принималось 0,18 (м²·К)/Вт.

Расчет проводился для базового (R12) и трех наиболее часто рекомендуемых в литературных источниках рабочих веществ: R134a, R245fa, R601 (n-pentane).

Результаты расчета коэффициента теплоотдачи рабочих веществ при конденсации движущегося пара на пучке труб представлены на рис. 1. Диапазон рассматриваемых температур насыщения t_s , °C, определен сопротивлением слоя загрязнений (при $t_s > 50$ °C оно возрастает более, чем в два раза), существенно влияющим на характеристики теплообменного аппарата.

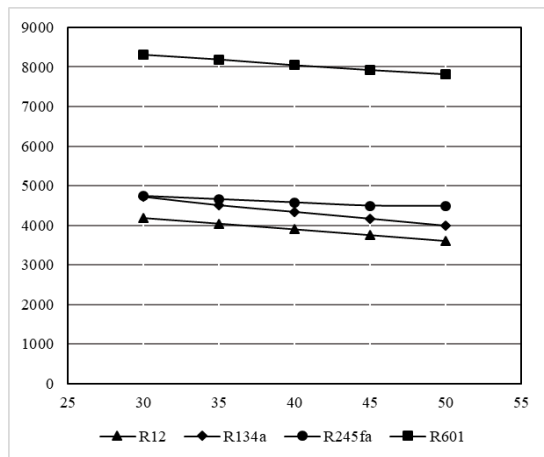


Рис. 1. Средние коэффициенты теплоотдачи, Вт/(м²·К), при конденсации различных фреонов в кожухотрубном теплообменном аппарате, отнесенные к полной наружной площади поверхности труб

Анализ полученных результатов свидетельствует о существенном превышении коэффициента теплоотдачи при конденсации R601 в аппарате в сравнении с другими рабочими веществами при прочих идентичных параметрах. Такое существенное расхождение может быть обусловлено различием в свойствах веществ или несовершенством методики расчета теплоотдачи. Данные результаты подлежат дополнительному изучению.

Список литературы

1. Данилова Г.Н., Богданов С.Н., Иванов О.П., Медникова Н.М., Крамской Э.И. Теплообменные аппараты холодильных установок / Под ред. Г.Н. Даниловой. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1986. – 303 с.: ил.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-79-10074). <https://rscf.ru/project/23-79-10074/>

V.I. Kuznetsov¹, I. S. Antanenkova¹

¹ National Research University Moscow Power Engineering Institute,
Russia 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya St., 14

HEAT TRANSFER COEFFICIENTS OF CONDENSING FREONS IN SHELL-AND-TUBE HEAT EXCHANGERS

Ю.В. Кустиков, С.В. Веретенников, В.И. Богданов

¹ Рыбинский государственный авиационный технический
университет имени П. А. Соловьева,
Россия, 152934, Рыбинск, , ул. Пушкина, 53

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ МОЩНОСТИ ГТД

Поиск способов повышения мощности и КПД газотурбинных двигателей в целом и тепловых электростанций на их основе в частности составляют важную научно-техническую задачу.

Впрыск воды в тракт двигателя является одним из таких способов. Это направление повышения эффективности компрессора является одновременно эффективным и дешёвым.

В ходе выполнения данной работы была разработана методика расчёта компрессора, реализующего «влажное сжатие», с использованием конечных разностей, построением одномерной сеточной модели. Была проанализирована сеточная сходимость всех участков сетки, определены рекомендуемые длины шага давления для нагрева жидкой воды и для испарения воды, которые обеспечат необходимую точность, не делая расчёт излишне громоздким.

Далее расчёт был адаптирован для реального процесса на ступенях компрессора двигателя Е8-01. В результате были получены графики процесса и распределение работ по ступеням для разных количеств воды, впрыснутой на входе в двигатель. Вода уменьшает работу на ступенях, расчёт не выявил перераспределения работ между ступенями. Это может быть связано с неучтённым влиянием гидродинамических факторов.

Также исследовался способ повышения мощности ГТД при помощи впрыска воды в камеру сгорания, а также использованием обогащения воздуха кислородом и использования цикла с подводом теплоты при постоянном объёме[1]. Был рассмотрен случай стехиометрического горения метана в воздухе, при этом температура снижалась впрыском воды до уровня, необходимого из соображений прочности турбины. Степень увеличения давления в компрессоре – 20. Температура на выходе из камеры сгорания составляла 1500K для изобарного подвода теплоты и 2100 для изохорного. В последнем случае возможна более высокая температура, так как двигатель работает прерывисто, и горячий газ омывает рабочую поверхность лопатки периодически, а не непрерывно.

При этом влияние впрыска воды при изохорном подводе теплоты было более комплексным. Впрыск воды увеличивал количество частиц рабочего тела, при этом эти частицы не требовали значительной работы для поднятия давления. Это увеличивало давление за счёт увеличения числа частиц газа в

том же объёме – 6,6 МПа при 21% кислорода до 7,4 МПа при 40% (доли кислорода объёмные).

Увеличение концентрации кислорода увеличивало количество подаваемого топлива, что требовало больше воды – для 21% кислорода 58 г топлива и 309 г воды, для 40% - 108 г топлива и 748 г воды. Это усиливало эффект, описанный выше.

Это определило следующие особенности влияния впрыска воды на цикл с изобарным и изохорным подводом теплоты.

КПД цикла с изохорным подводом теплоты рос вместе с концентрацией кислорода (от 60% до 63%), в то время как КПД цикла с изобарным подводом теплоты оставался практически неизменным (некоторое падение от 49,4% до 49,3%).

Мощность, рассчитанная на 1 кг воздуха, подаваемого в компрессор, значительно вырастала в обоих циклах. Рост мощности цикла с изохорным подводом теплоты больше – от 1,9 МВт до 3,6 МВт в сравнении с ростом при изобарном подводе от 1,5 МВт до 2,8 МВт.

Температура выхлопа во всех случаях была сопоставимой.

Стоит отметить, что в качестве горючего использовался метан. При его сгорании в кислороде не происходит увеличения частиц – из одной молекулы метана и двух кислорода образуется одна молекула углекислого газа и две молекулы воды. Если горючее будет более высокомолекулярным, например, керосин, будет ещё один фактор роста количества частиц, что увеличит эффективность цикла с изохорным подводом теплоты. В случае обычного горения топлива подаётся незначительное количество, и этим обычно пренебрегают. В случае объекта рассмотрения благодаря впрыску воды можно подать больше топлива, и этот фактор становится важным.

Рост количества частиц важен только для энергетики двигателя с изохорным подводом теплоты. В случае с изобарным подводом теплоты этот фактор влияет только на изменение удельного объёма рабочего тела (рассчитанного на 1 кг воздуха, подаваемого в компрессор).

Список литературы

1. Богданов В.И., Веретенников С.В., Кустиков Ю., Сизов В.П. Анализ перспектив комплексной реализации в ГТД цикла с изохорным подводом тепла, отделением азота и впрыском воды// «Газотурбинные технологии», 2024, №1. – с. 22-26.

J.V. Kustikov, S.V. Veretennikov, V.I.Bogdanov

¹ P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University,
Russia 152934, Rybinsk, Pushkin St., 53

METHODS OF INCREASING PERFORMANCE OF GAS TURBINES

М.Д. Знамеровский^{1,2}, Л. В. Петров²

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

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПАРОГАЗОВОЙ СРЕДЫ В ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКЕ НА ПРИМЕРЕ ЭКСПЕРИМЕНТА CASP3

Одним из ключевых процессов, учитываемых при моделировании переноса аэрозолей внутри защитной оболочки (ЗО) в ходе тяжёлой аварии на АЭС с ВВЭР, является осаждение аэрозольных частиц на внутренних поверхностях помещений ЗО [1]. При этом паровоздушная среда в этих помещениях представляет собой смесь водяного пара, неконденсируемых газов, паров и аэрозолей продуктов деления и материалов конструкций. На поведение аэрозолей существенное влияние оказывают теплогидравлические параметры внутри защитной оболочки.

В рамках данной работы проведено моделирование эксперимента CASP3[2], который посвящён исследованию изменения давления, температуры среды и коэффициента теплоотдачи при истечении двухфазной среды в объём экспериментальной установки. Моделирование эксперимента проводилось с использованием программного средства АНГАР [3], которое предназначено для расчётного моделирования изменения теплофизических параметров и фракционного состава парогазовой среды в объёме ЗО.

Основой моделирования является составление расчётной схемы, учитывающей элементы моделируемого объёма. Разработана расчётная схема, состоящая из трёх помещений: верхний отсек с дефлекторной пластиной, расходомерная трубка и нижний отсек с приемком (Рис.1), подготовлены исходные данные по поступлению парогазовой среды в объём экспериментальной установки.

Проведены серии расчётов с целью отладки расчётной схемы с учётом окрашивания поверхностей, а также с использованием различных встроенных моделей теплоотдачи программного средства АНГАР. Результаты итогового расчёта сопоставлены с соответствующими экспериментальными данными, проведён сравнительный анализ, который показал качественную сходимость результатов расчёта с экспериментальными данными.

В результате расчётов были получены зависимости избыточного давления в помещениях, которые удовлетворительно сходятся с результатами

эксперимента, температура парогазовой среды (Рис.2), которая имеет хорошую сходимость с экспериментальными данными, температура жидкости, конденсирующейся на стенах 3О, температура внутренних поверхностей.

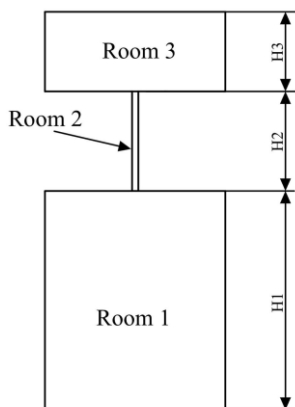


Рис. 1. Изображение расчётной схемы

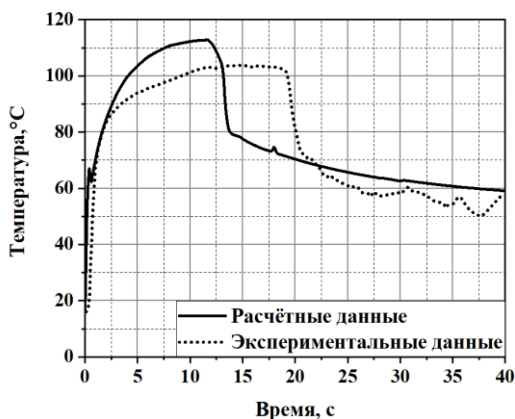


Рис. 2. Расчётная температура среды в расходомерной трубке

Список литературы

1. Самойлов О.Б. Безопасность ядерных энергетических установок: Учебное пособие для вузов. М: Энергоатомиздат, 1989 – 280с.
2. Marshall, J., Woodman W. Comparison Report on Containment Analysis Standard Problem №3. OECD & NEA, CSNI Report №77, 1982.
3. Kljenak I., Kuznetsov M., et al. Simulation of hydrogen deflagration experiment – Benchmark exercise with lumped-parameter codes//Nuclear Engineering and Design 283(2015)51-59

M.D. Znamerovsky^{1,2}, L.V. Petrov²

¹ National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,
Russia, 111250 Moscow, Krasnokazarmennaya street, 14

² National Research Center “Kurchatov Institute”,
Russia, 123182, Moscow, pl. Academician Kurchatov, 1

NUMERICAL SIMULATION OF THERMAL-HYDRAULIC PARAMETERS OF VAPOR-GAS ENVIRONMENT IN THE CONTAINMENT USING EXAMPLE OF CASP3 EXPERIMENT

М.С. Коротков¹, С.В. Скрыбиков¹, О.А. Гобызов^{1,2}, К.А. Амосов¹

¹ ООО «Сигма-Про»,

Россия, 630090, Новосибирск, ул. Инженерная, 28

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

Россия, 630090, Новосибирск, пр. Лаврентьева 1

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ СКОРОСТНОЙ ПАНОРАМНОЙ ДИАГНОСТИКИ

Технологический скачок второй половины XX века, приведший к появлению лазерной и цифровой техники, послужил толчком к возникновению на рубеже XX-XXI веков панорамных оптических методов измерений. Такие методы позволили проводить бесконтактную диагностику потоков с возможностью получения мгновенных распределений физических характеристик по области исследуемого объекта. Совершенствование аппаратной и алгоритмической базы привело к повышению пространственного разрешения и возможности обработки больших объёмов данных, а также к возникновению методов контроля быстропротекающих процессов с привязкой ко времени и к появлению методов трёхмерной диагностики.

Оптические комплексы панорамной диагностики «ПОЛИС», разработанные компанией «Сигма-Про» включают в себя высококачественные лазерные системы и цифровые камеры, уникальные разработки в области оптики и механики и программное обеспечение *Actual Flow* для автоматизированного сбора, обработки и визуализации данных. Основой исследовательских систем являются методы: *PIV*, *PTV*, *Shadow Photography*, *IPI*, *LIF*, *DIC* и др.

Особенностью *стандартной системы* регистрации двумерной скорости потоков жидкости или газа ($v_{max} > 1500$ м/с для опросного окна 64×64 пикс) является наличие одной цифровой ПЗС-камеры (с буферизацией столбцов) с возможностью регистрации двух кадров с задержкой между экспозициями 200 нс, а также высокоэнергетической (200 мДж/импульс) двухканальной лазерной системы с ультракороткой (7 нс) длительностью импульса, сведением пучков и *Top-Hat* профилем излучения. Специальный объектив позволяет преобразовать лазерный пучок в «нож» с толщиной не более 1 мм (по уровню $1/e^2$) на дистанции $0,5$ - $2,5$ м, концентрируя максимальную световую энергию в области измерений. В зависимости от характеристик исследуемой среды система комплектуется генераторами жидкого (на основе масла; размер частиц < 5 мкм), твёрдого (TiO_2 ; ~ 1 мкм) аэрозоля для засева газовых потоков или набором полиамидных частиц (в т.ч. люминесцентных для работы с двухфазными потоками и устранения фоновых отражений; до 5 мкм) для введения в жидкий флюид. Диагностика трёхкомпонентной скорости в узком сечении потока становится возможной при добавлении второй камеры к системе. Реализация *стереоскопической*

регистрации включает в себя коррекцию области резко изображаемого пространства (ОРИП) - угла Шаймпфлюга - и проведение калибровки с последующей реконструкцией поля скорости течения. Применение трёх и более камер позволяет получать наиболее полную информацию о структуре потока. Особенностью *томографической системы* является наличие четырёх цифровых камер с более сложными устройствами угловой коррекции ОРИП и специальным объективом для объёмной ($100 \times 50 \times 50 \text{ мм}^3$) лазерной засветки.

Регистрация процессов с привязкой ко времени возможна при использовании *систем скоростной диагностики* ($v_{\max} < 20 \text{ м/с}$ для окна $64 \times 64 \text{ пикс}$). Такие системы включают в себя высокоскоростные камеры (до 10000 к/с при разрешении 1 Мпикс) и двухканальные лазеры (до 10 кГц/канал). Поскольку процесс съёмки скоростной КМОП-камеры происходит эквидистантно (равные интервалы между экспозициями), для диагностики более скоростных потоков реализуется синхронизация работы лазера по типу двухкадровой съёмки: генерация импульса в конце нечётного и начале чётного кадра, за счёт чего удаётся сократить межимпульсный интервал до $2\text{--}10 \text{ мкс}$, что позволяет разрешать сверхзвуковые течения до 3 М . Особенностью такого режима съёмки является получение большой совокупности данных за короткий временной промежуток с пространственным разрешением до 500 мкм/вектор . Возможности ПО включают в себя гибкое управление синхронизацией различных устройств и быструю анимацию больших массивов полученных данных.

Регистрация размеров частиц оптически прозрачных газокapельных потоков возможна при помощи *теневого системы диагностики*. Применение дальнодействующего микроскопа с увеличением $> 12 \text{ крат}$ при минимальном рабочем расстоянии $\sim 10 \text{ см}$ позволяет исследовать среды с оптическим разрешением до 1 мкм/пикс (минимальный распознаваемый размер капли $\sim 6\text{--}10 \text{ мкм}$). Для определения масштабного коэффициента используется специальная мишень с точностью нанесения маркеров $< 1 \text{ мкм}$. Применение мощного импульсного светодиодного источника позволяет упростить процесс подсветки.

Контроль формы и перемещения твёрдых тел реализуется при помощи *системы исследования деформаций* с использованием бинокулярного машинного зрения. Применяемые алгоритмы цифровой корреляции изображений и триангуляции позволяют с точностью до *нескольких мкм/мм* определять деформации и восстанавливать форму поверхности с погрешностью $< 0,5\%$.

M.S. Korotkov¹, S.V. Skryabikov¹, O.A. Gobysov^{1,2}, K.A. Amosov¹

¹ Sigma-Pro LLC,

Russia, 630090, Novosibirsk, Inzhenernaya St., 28

² S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS

Russia, 630090, Novosibirsk, Lavrentiev Ave, 1

OPTICAL SYSTEMS FOR HIGH-SPEED PLANAR DIAGNOSTICS

М.Д. Коновалова¹, М.Т. Орехова², Н.Н. Кожухов²

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Россия, 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1;

² Воронежский государственный технический университет,
Россия, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ОРЕБРЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ С НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНЫМ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЕМ

В настоящее время активно развивается направление использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии для автономного энергоснабжения удаленных объектов. Их энергия может быть преобразована в термоэлектрических генераторных модулях, солнечных батареях, теплонасосных системах и др. Как правило, такие источники являются низкопотенциальными с точки зрения удельного тепловыделения. Соответственно, актуальной задачей является отвод теплоты от них для дальнейшего использования или преобразования. Одним из способов отвода тепла является использование оребренных поверхностей. В связи с тем, что источник является низкопотенциальным и зачастую имеет не очень высокую температуру относительно окружающей среды, то системы отвода тепла обладают довольно большими массогабаритными характеристиками. Это негативно сказывается как на стоимости таких систем, так и на их компактности. Таким образом, целью настоящей работы является разработка эффективной системы отвода тепла за счет оребрения поверхности с изменяющейся геометрией.

Известно, что эффективность оребрения поверхности (эффективность ребра) определяется по соотношению [1]. Кроме этого, в [2] выдвинута гипотеза, подтвержденная результатами вычислительного эксперимента об эффективности использования переменной геометрии в теплообменниках с круглыми ребрами.

$$E_p = \frac{th(ml)}{ml}; \quad m = \sqrt{\frac{\alpha P}{\lambda F}},$$

где l - длина ребра; α - коэффициент теплоотдачи; λ - коэффициент теплопроводности; P - периметр; F - площадь поверхности ребра.

Расчетная область приведены на рис.1. Подвод теплоты осуществляется через нижнюю стенку. На оребренной поверхности задаются граничные условия 3-го рода с учетом свободной конвекции для охладителя. Для плотной упаковки ребер в расчетах использовался коэффициент затенения проходного сечения между ребрами [3].

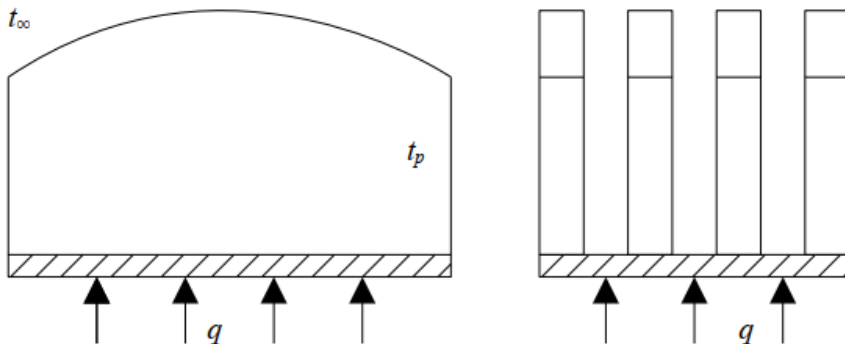


Рис. 1. Расчетная область

Расчеты проводились на основе известных аналитических решений [1] в программном комплексе SMath, а также моделировались в программном комплексе Comsol Multiphysics. В расчетах варьировалась высота оребрения по длине канала, количество ребер в модели, а также учитывалось влияние соседних ребер на теплообмен. В результате получено, что применение оребрения переменной геометрии позволяет увеличить отводимый тепловой поток до 17%. При этом снижение материалоемкости при изготовлении ребер составит до 12%.

Список литературы

1. Теория тепломассобмена: учебник для ВУЗов / [С.И. Исаев и др.]; под ред. А.И. Леонтьева. – 3-е изд. испр. и доп. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. – 462 с.
2. Konovalov D. A., Ryazhskikh V. I., Lazarenko I. N. and Kozhukhov N. N. Model of Cooling of Compact Surfaces by Microchannel Recuperative Heat Exchangers with a Matrix of Filamentary Silicon Single Crystals. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, March 2019, Volume 92, 2, pp. 355–364.
3. Базыкин, Д.А. Моделирование и анализ распределения температуры стенки канала при ее оребрении продольными ребрами фиксированной и переменной высоты / Д.А. Базыкин, С.В. Дахин // *Энергетические системы*. – 2024. – № 2. – С. 35-43.

M.D. Konovalova ¹, M.T. Orehova ², N.N. Kozhukhov ²

¹National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,
Russia, 111250, Moscow, st. Krasnokazarmennaya, 14, building 1.

²Voronezh State Technical University,
Russia, 394006, Voronezh, st. 20th anniversary of October, 84;

DETERMINATION OF THE EFFECTIVE FIN CONFIGURATION FOR SYSTEMS WITH LOW-POTENTIAL ENERGY RELEASE

Н.Д. Гладили¹, В.В. Шеркунов¹, В.Н. Ковальногов¹

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

КОМБИНИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ С ПРИМИНЕНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Введение. Теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), являются одним из основных источников энергии и тепловых ресурсов в современной российской энергетике. Современные тенденции показывают, что количество необходимых энергоресурсов будет с каждым годом расти. Данный процесс может привести к повышению вредоносных выбросов и проблемам с необходимыми энергоресурсами. Для решения данной проблемы оборудование ТЭЦ может быть оптимизированно. Так как модели машинного обучения активно применяются в сфере энергетики, как например в работах [1-4], было принято решение использовать комбинированный метод оптимизации оборудования.

Процесс оптимизации. Современные ТЭЦ для выделения энергии и тепла используют котельно-турбинные установки. Суть данных систем заключается в выделении пара с помощью котла и транспортировки этого пара на турбину, где потенциальная энергия пара преобразуется в электрическую. Основным параметром в данном процессе является значение мощности в мегаваттах (мВт), которая развивается на клеммах генератора турбины. Разработанный комплекс моделей машинного обучения представляет собой комбинацию моделей прогнозирования мощности и оптимизации.

Данные для машинного обучения были получены в ходе математического моделирования процесса горения. Данный процесс заключается в использовании 3D-модели горелочного устройства в качестве домена для вычислений методом конечных объемов в рамках системы вычислительной гидродинамики. Входными параметрами являются характеристики сгораемого топлива. После настройки параметров в среде происходит моделирование горения с сохранением результатов, например количество эмиссии NOx. Для моделирования турбулентных потоков и горения в данном процессе применяются RANS-подход с использованием k-epsilon модели для описания турбулентности, а также флеймлет модель для учета химических реакций и взаимодействия между турбулентностью и горением.

Для прогнозирования мощности применяется архитектура долгой краткосрочной памяти (LSTM). Спрогнозированное значение подается в модель

оптимизации. Для оптимизации применяется модель обучения с подкреплением (RL). Данная модель обучена выявлять маршрут из действий, которые необходимо выполнить с параметрами горения для уменьшения выбросов.

Результат работы модели представляет собой маршрут из состояния к прогнозируемому значению до состояния с наименьшим количеством выбросов и представлен на рисунке 1.

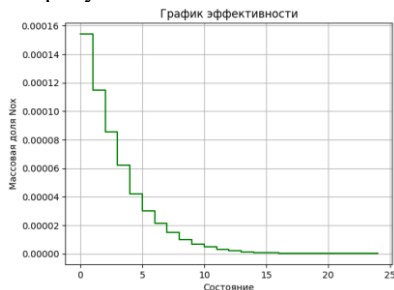


Рис. 1. График эффективности работы комплекса моделей

Заключение. В результате был построен комплекс моделей, который производит прогноз необходимых значений мощности и после выявляет действия необходимые для уменьшения вредоносных выбросов.

Результаты получены в лаборатории междисциплинарных проблем энергетики УлГТУ при поддержке мегагрантом Правительства РФ по проекту 075-15-2021-584

Список литературы

1. Zhan X. et al. Deepthermal: Combustion optimization for thermal power generating units using offline reinforcement learning //Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. – 2022. – Т. 36. – №. 4. – С. 4680-4688.
2. Zhao P. et al. A deep reinforcement learning framework for optimizing fuel economy of hybrid electric vehicles //2018 23rd Asia and South Pacific design automation conference (ASP-DAC). – IEEE, 2018. – С. 196-202.
3. Kegyes T. et al. Generally Applicable Q-Table Compression Method and Its Application for Constrained Stochastic Graph Traversal Optimization Problems //Information. – 2024. – Т. 15. – №. 4. – С. 193.
4. Tong Z. et al. Dense residual LSTM-attention network for boiler steam temperature prediction with uncertainty analysis //ACS omega. – 2022. – Т. 7. – №. 13. – С. 11422-11429.

N.D. Gladilin¹, V.V. Sherkunov¹, V.N. Kovalnogov¹

¹ Ulyanovsk State Technical University,
Russia 432027, Ulyanovsk, st. Severny Venets, 32

**COMBINED APPROACH TO OPTIMIZING THE OPERATION OF
POWER EQUIPMENT OF POWER PLANTS USING MACHINE
LEARNING**

Н.А. Старовойтов¹, О.В. Митрофанова^{1,2}, И.Г. Поздеева^{1,2}

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

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

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ РЕЗОНАНСНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ЗАКРУЧЕННЫХ ТЕЧЕНИЯХ В КАНАЛАХ СУДОВЫХ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Исследования развития акустических резонансных явлений в каналах сложной геометрии перспективных ядерных энергетических установок имеет важное значение для повышения ресурса их эксплуатации. Генерация акустических колебаний устойчивыми вихревыми структурами исследовалась в работе [1], где представлено подробное описание экспериментальной установки, метода визуализации и измерения параметров течения и акустического поля. Рабочим участком экспериментального стенда являлась вихревая камера, в нижнюю часть которой по тангенциальному подводу нагнетался компрессором осушенный воздух. Верхней торцевой поверхностью камеры являлась крышка из плексигласа с центральным отверстием. Незакрепленная преграда в виде круглого диска, также выполненного из плексигласа, могла свободно вращаться и перемещаться вдоль вертикальной оси.

Методами теории размерности было найдено, что измеряемые в ходе эксперимента значения перепад давления Δp , расхода через рабочий участок W и характерной частоты колебаний $f_{\text{хар}}$, ассоциируемой с меридиональным вращением тороидального вихря [1] связаны между собой критериальной зависимостью вида $Sh \cdot Re^3 = f(Eu \cdot Re^4)$, где число Рейнольдса определяется как $Re = u_{\text{вх}} d_{\text{вх}} / \nu$, число Струхала – $Sh = f_{\text{хар}} d_{\text{вх}} / u_{\text{вх}}$ и число Эйлера – $Eu = \Delta p / (\rho u_{\text{вх}}^2)$. Масштабы в критериях подобия определяются как: $u_{\text{вх}}$ и $d_{\text{вх}}$ – средняя скорость потока и диаметр трубопровода на входе в рабочий участок, ρ и ν – плотность и кинематическая вязкость среды.

На рис. 1 представлен результат обработки данных нескольких экспериментов с преградой диаметра 70 мм. Экспериментальные точки ложатся близко к прямой линейной аппроксимации, полученной методом наименьших квадратов. Из линейного характера экспериментальной зависимости следует, что критериальная зависимость может быть упрощена до вида $Sh = A \cdot Eu \cdot Re$, где A – константа, зависящая от размеров преграды. Эта зависимость аналогична используемой для описания автоколебаний при обтекании препятствия внешним потоком.

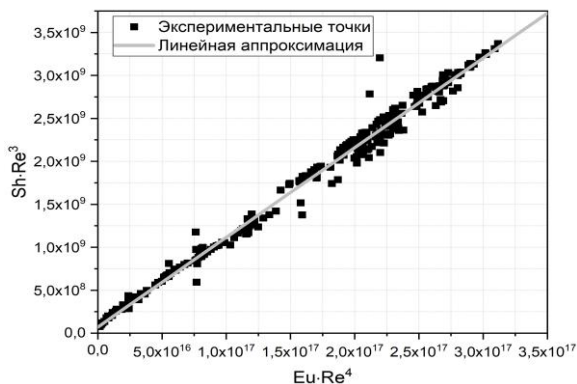


Рис. 1. Экспериментальная зависимость $Sh \cdot Re^3$ от $Eu \cdot Re^4$.

Как было показано в монографии [2], с точки зрения термодинамики формирование устойчивых структур в потоке под действием массовых сил, аналогично фазовым переходам второго рода. В закрученном потоке под действием сил инерции происходит структуризация потока. В результате структуризации течения образуются вихреобразования, обтекаемые внешним неструктурированным потоком. В случае рассматриваемого эксперимента таким устойчивым вихреобразованием является тороидальный вихрь. Генерация акустических колебаний системой связана с процессом отрыва тонких спиральных вихрей, возникающих при обтекании тороидального вихря неструктурированным потоком среды.

Список литературы

1. Митрофанова О.В., Поздеева И.Г., Старовойтов Н.А. Экспериментальные исследования устойчивой формы вихревой структуры закрученного течения // Инженерно-физический журнал. 2025. Т. 98. №1 С. 218-228
2. Новиков И.И. Термодинамика спинодалей и фазовых переходов: Монография / И. И. Новиков; Рос. акад. наук. Ин-т металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова. — Москва: Наука, 2000. — 164 с.

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

¹ National Research Nuclear University MEPHI, Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe sh 31

² National Research Center "Kurchatov Institute", Russia, 123182 Moscow, Akademika Kurchatova pl., 1

REGULARITIES OF DEVELOPMENT OF RESONANCE PHENOMENA IN TWISTED FLOWS IN CHANNELS OF MARINE NUCLEAR POWER PLANTS

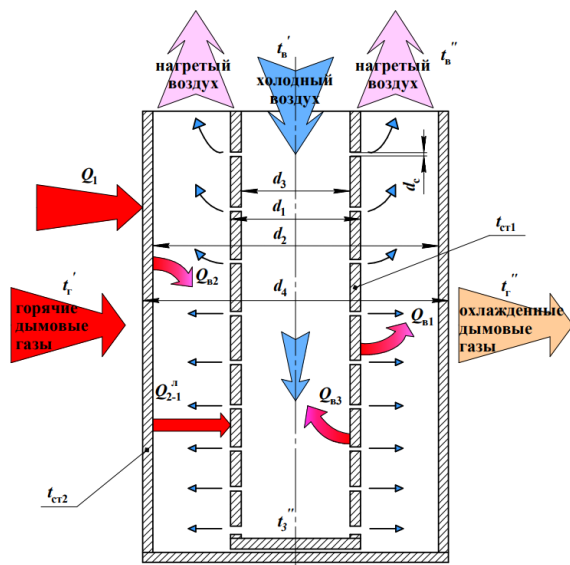
Д.В. Артюшенко¹, В.С. Муравьева¹, П.Д. Алексеев¹, Ю.Л. Леухин¹

¹ Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова,
163002, Архангельск, набережная Северной Двины, 17

МЕТОДИКА ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА СТРУЙНОГО МОДУЛЬНОГО РЕКУПЕРАТОРА

Струйный обдув рабочей поверхности находит применение в рекуперативных устройствах различного конструктивного исполнения. Из них следует отметить надежный и эффективный в работе струйный модульный рекуператор [1,2]. Рекуператоры этого типа легко komponуются в пучки необходимых размеров и помещаются в газоходы, обеспечивают подогрев воздуха, используемого для горения топлива, до 300...500°C при температуре уходящих газов 700...1200 °C. Однако широкое внедрение таких рекуператоров сдерживается высокой сложностью выполнения их теплового и аэродинамического расчетов и отсутствием инженерных методик. В расчетах необходимо предварительно задаваться значениями сразу нескольких температур: наружной $t_{ст2}$ и внутренней $t_{ст1}$ труб модуля, средней температурой воздуха в перфорированной трубе t_3'' и на выходе из самого модуля $t_в''$. Достоверность принятых значений проверяется сравнением величин всех тепловых потоков – путем составления тепловых балансов рабочих поверхностей модуля (рис. 1). Математическая модель теплового расчета позволяет с выбранной точностью определить все тепловые потоки, участвующие в процессе теплопередачи от дымовых газов к нагреваемому воздуху. Разработанные авторами методики инженерного расчета и энергоэкономического анализа работы модульных рекуператоров реализованы в среде программирования Python и позволяют осуществить многовариантные расчеты при изменении конструктивных и режимных характеристик. В методике аэродинамического и теплового расчетов модульного рекуператора используются полученные авторами уравнения для расчета теплоотдачи и сопротивления [1].

Разработанная методика позволила выполнить тепловой расчет модульного рекуператора для стекловаренной печи, обогреваемой двумя горелками ГНП–3 с общей тепловой мощностью 350 кВт. Топливом для горелок служит природный газ из газопровода Ньюксеница – Архангельск, температура уходящих из печи газов 1200°C. Рекуператор состоит из 20 модулей, расположенных в шахматном порядке – 4 ряда по 5 модулей в каждом ряду. Наружный диаметр модулей равен 76 мм, высота равна высоте газохода – 700 мм. Рекуператор обеспечит подогрев воздуха от 30°C до 475°C, экономия топлива составит 15,3%. При планируемом сроке эксплуатации 3 года, срок окупаемости будет равен 7 месяцам, а чистый дисконтированный доход – 222 тыс. рублей.



Q_1 – суммарный тепловой поток, передаваемый от дымовых газов к модулю; Q_{n2} – тепловой поток, передаваемый от внутренней поверхности наружной трубы к воздуху в кольцевом канале; Q_{2-1} – тепловой поток, передаваемый излучением от поверхности наружной трубы к внутренней; Q_{n1} – тепловой поток, передаваемый от внутренней трубы к воздуху в кольцевом канале; Q_{n3} – тепловой поток, передаваемый от внутренней поверхности внутренней трубы к воздуху

Рис. 1. Расчетная схема тепловых потоков в модульном рекуператоре

Список литературы

1. Исследование аэродинамики и теплоотдачи струйного модульного рекуператора / П.Д. Алексеев, Ю.Л. Леухин. Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Тезисы докладов XXIII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева (24-28 мая 2021 г., г. Екатеринбург). – М.: Издательский дом МЭИ, 2021. С. 268-269.
2. Патент № 2808888 С1, Российская Федерация, МПК F23L 15/04. Теплообменный элемент рекуператора: № 2023111309: заявл. 02.05.2023; опубл. 05.12.2023 / Ю. Л. Леухин, П. Д. Алексеев; заявитель: Северный федеральный университет. – EDN RMNSEO.

D.V. Artyushenko¹, V.C. Muravyeva¹, P.D. Alekseev¹, Y.L. Leukhin¹

¹ Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov,
17 Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002

METHODOLOGY OF THERMAL CALCULATION OF JET MODULAR RECUPERATOR

МОДЕЛИРОВАНИЕ, ДИАГНОСТИКА И ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ СРЫВА В ОСЕВОМ МНОГОСТУПЕНЧАТОМ КОМПРЕССОРЕ

Выполнен анализ современных исследований [1,2,3] явления вращающегося срыва в осевых многоступенчатых компрессорах ГТД во время запуска. Более полувека вращающийся срыв считается в мире одним из самых серьезных вопросов аэродинамики компрессоров ГТД. На ПАО «ОДК-Сатурн» также столкнулись с проявлениями вращающегося срыва на низких режимах работы ГТД ($n_{вд} < 60\%$). Вращающийся срыв возникает из-за несоответствия рабочих точек ступеней компрессора на низких оборотах и приводит к резкому снижению КПД компрессора, является причиной усталостных повреждений лопаток, вызывает «горячее» зависание двигателя и требует незамедлительных компенсирующих мероприятий при эксплуатации ГТД. Исторически проявления вращающегося срыва связывали с наклоном напорных характеристик компрессора, распределением работы между первой и последней группой ступеней, увеличением суммарной степени повышения давления.

Экспериментально было показано влияние объема за компрессором на его характеристики: если на выходе из компрессора объем полости мал, то компрессор, скорее всего, будет попадать в режим срыва потока, и, наоборот, если полость большая, то в компрессоре может наступить помпаж. Срыв потока не только предшествует помпажу, но и является его причиной. Выявлено влияние радиальных зазоров на запуске на склонность компрессора к срыву: если на низких режимах большой радиальный зазор, то срыв наступает раньше.

Работы по активному контролю и управлению вращающимся срывом были прекращены в США и в Великобритании ввиду того, что они оказались не эффективными.

Управление углами РНА и расходом отбираемого (подаваемого) воздуха позволяет снизить риск срыва или исключить его появление.

Использование нестационарного CFD-моделирования (URANS) позволяет предсказать количество областей срыва, их положение и уровень пульсаций давления, что способствует оптимизации конструкции (уменьшение числа регулируемых лопаток, снижение затрат на доводку компрессора). Результаты моделирования [2] согласуются с

экспериментальными данными. Исследование основано на моделировании 8-ступенчатого компрессора с использованием URANS. Расчеты проводились для условий запуска ($n_{вд}=50\%$) с фиксированными и регулируемыми лопатками. Тестовый компрессор ($n_{вд100\%}=14400$ об/мин) оснащен системой регулирования углов РНА. Проверены два варианта: нормальный запуск и запуск с фиксированными лопатками 3-й ступени. Высокочастотные измерения пульсаций давления и обработка данных позволили определить число регионов срыва и их скорость вращения.

Нестационарное CFD-моделирование (URANS) показало:

- хорошее соответствие с экспериментами по числу областей срыва (3–5) и уровню пульсаций давления (погрешность $\leq 10\%$);
- расхождение в скорости вращения регионов срыва: $0.385 \cdot f_p$ (CFD) против $0.42\text{--}0.44 \cdot f_p$ (эксперимент);
- при фиксации лопаток НА 3-й ступени область срыва расширяется до 5-й ступени;
- прикрытие лопаток НА 2-й ступени снижает нагрузку на них, что подавляет образование ячеек со срывом потока. URANS-моделирование подтвердило исчезновение низкоэнергетических зон в этом случае.

Результаты применимы для оптимизации управления запуском ГТД.

Таким образом, результаты демонстрируют, что URANS-моделирование — эффективный инструмент для оптимизации систем управления запуском. При этом регулировка углов РНА позволяет минимизировать зоны срыва, сократить затраты на проектирование и повысить надежность газотурбинных установок. Однако для полной автоматизации проектирования требуется повышение точности предсказания скорости вращения регионов срыва, в том числе оптимизация газодинамических и регулирующих параметров в более широком диапазоне с использованием, возможно, имеющихся и обновленных обобщений аэродинамических продувок решеток лопаток и результатов натурных испытаний компрессоров.

Список литературы

1. I. J. Day Stall, Surge, and 75 Years of Research // Journal of Turbomachinery, Vol. 138, 2016.
2. Ryosuke Mito, Satoshi Yamashita Prediction of rotating stall during startup for axial compressors // ASME Turbo Expo, GT2019-91340.
3. Zeyuan Yang1, Yadong Wu, and Hua Ouyang Investigation on mode characteristics of rotating instability and rotating stall in an axial compressor // ASME Turbo Expo, GT2021-58929.

R.A. Didenko¹

¹ JSC UEC-Saturn,

Russia 152903, Rybinsk, Prospect Lenina, 163

ROTATING STALL IN HIGHLY LOADED AXIAL COMPRESSORS STUDY

Ф.В. Сиротин¹, В.Н. Ковальногов¹

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ЛИТЬЕ

Технология непрерывного литья (рис. 1) является относительно новой, и ранее не применялась для сплава силумина и магния. Продуктом технологии является полоса толщиной 1...2 мм. За последние 10 лет были запатентованы несколько установок для непрерывного и полу-непрерывного литья алюминиевых сплавов, в этих технологиях применяется кристаллизатор, установленный перед валками, для охлаждения большого объема расплава [1, 2]. Перспективным представляется решение, при котором использование кристаллизатора не потребуется: функцию кристаллизатора выполняют валки.

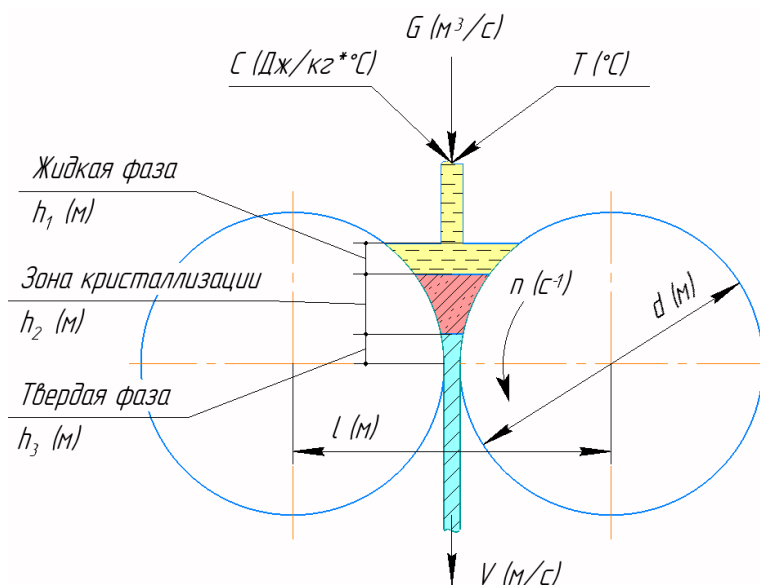


Рис. 1. Схема процесса непрерывного литья полосы.

Для отладки технологии и эффективной работы с новыми сплавами необходимо достоверно оценивать нестационарное температурное поле и изменение фазового состояния материала в процессе обработки с учетом влияния технологических факторов: температуры расплава, массового расхода расплава и его теплофизических и механических свойств (с учетом их зависимости от температуры), диаметр валков, расстояние между валками, частота вращения валков, скорость выхода готовой полосы. При этом необходимо минимизировать температурные градиенты, оптимизировать расход расплава, локализовать границы зон фазовых превращений. Для этого нами разрабатывается математическая модель процесса и на ее основе строится параметризованный цифровой двойник, чтобы посредством вычислительного эксперимента в CFD-среде StarCCM+ проводить его комплексные исследования и вырабатывать обоснованные технологические решения.

Внедрение технологии предполагается на производстве ООО НПП "Металл-Композит" для изготовления алюминиевых пластин размерами 60х90 и толщиной 1,5 мм, которые используются в процессе получения композитного материала. На данный момент пластины получают вибрационной заливкой по 20 штук за 4 часа. Такой производительности недостаточно, для серийного производства композитов необходимо обеспечить потребность 20 штук в час. Действующий на производстве процесс энергозатратен, так как оснастка для заливки тонкостенных пластин нагревается в печах до 600°C.

В докладе представлены и обсуждаются предварительные результаты тестовых исследований и верификации цифрового двойника.

Список литературы

1. Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Загиров Н.Н. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов. М.: МАКС Пресс, 2005. 344 с.
2. Патент RU2724758C1. Устройство для бесслитковой прокатки и прессования металла.

Опубл. 21.01.2025. ***F.V. Sirotin*** ¹ ***V.N. Kovalnogov*** ²,

¹ Ulyanovsk State Technical University,
Russia 432027, Ulyanovsk, Severnyj Venec St., 32

MODELING OF THE CRYSTALLIZATION PROCESS OF ALUMINUM ALLOY IN CONTINUOUS CASTING

Е.В. Леонов¹, Ю.И. Шанин¹

¹ АО «Научно-исследовательский институт Научно-производственного объединения
«ЛУЧ»

Россия, 142103, Подольск, М.о., ул. Железнодорожная, 24

КРИЗИС ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ В СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ЗЕРКАЛ

К особенностям кипения в системах охлаждения лазерных зеркал можно отнести: 1) односторонний подвод тепла к системе узких каналов, 2) большой недогрев теплоносителя до температуры насыщения. В рассмотренной литературе чрезвычайно скупо представлены результаты исследований в подобных условиях. В основном они относятся к возможному развитию кризиса кипения при охлаждении горячей стенки термоядерного реактора [1-3].

Нами проведен анализ критических ситуаций, которые могут иметь место в системах охлаждения лазерных зеркал: 1) при наступлении кипения, запаривания каналов и достижения критических тепловых потоков (КТП), которые могут привести к повреждению зеркала, 2) при воздействии локальных пиковых тепловых нагрузок на зеркало [4] с дальнейшим возможным его повреждением. Для решения поставленных задач привлекались как аналитические методы для оценки значений КТП, так и моделирование методом электротепловой аналогии (ЭТА), где на фрагменте системы охлаждения зеркала исследовались поля температуры при запаривании канала и в результате воздействия пиковой тепловой нагрузки.

Нами экспериментально с помощью метода ЭТА рассмотрено влияние резкого ухудшения теплообмена на температурное поле во фрагменте системы охлаждения для следующих случаев «запаривания» прямоугольного канала: 1) паром покрывается верхняя грань канала охлаждения, 2) к верхней грани добавляется треть боковой грани, 3) верхняя грань и 2/3 боковой грани. Выявлено, что процесс «запаривания» самопроизвольно углубляется. Результатом этого является полное перекрытие канала паром (рассматривается как дефект системы охлаждения) с последующим разрушением зеркала. Для этого случая проведено аналитическое исследование задачи о поле температур в зеркале с подобным дефектом.

С помощью подходов, предложенных в [2, 3], аналитически оценены критические тепловые потоки при одностороннем тепловом нагружении системы охлаждения зеркала, приводящие к кризису кипения. Оценки и эксперименты проведены на модели, в качестве которой выбран фрагмент

лазерного зеркала с канальной системой охлаждения, реализованной в одном варианте изготовленных зеркал. Размеры канала охлаждения следующие: ширина и высота канала - $\delta_k=0,6$ мм, $h_k=1$ мм, толщина ребра - $\delta_p=1$ мм, толщина подложки - $\delta_n=1$ мм, толщина теплоизолированной основы - $\delta_o=2$ мм. Зеркало изготовлено из молибдена ($\lambda=130$ Вт/(м·К)). При моделировании задачи методом ЭТА заданы граничные условия: со стороны оптической поверхности тепловой поток с плотностью $q=4\cdot 10^7$ Вт/м² (подобные потоки характерны для зеркал), на боковых гранях соблюдены условия симметрии ($\partial T/\partial y = 0$), тыльная сторона основы теплоизолирована, на поверхностях канала охлаждения заданы граничные условия третьего рода (коэффициент поверхностной теплоотдачи $\alpha=\text{const}=4\cdot 10^4$ Вт/(м²·К)). Теплоноситель – вода при температуре $T_{\text{ж}}=20^\circ\text{C}$.

С точки зрения наступления критических ситуаций рассмотрено воздействие на зеркало локальной (пиковой) лазерной нагрузки. В зависимости от размера пиковой нагрузки по сравнению с толщиной подложки и ее материала проанализированы температурные поля в случае: 1) рассмотрения подложки как полупространства, 2) наличия в подложке двухмерных растечек тепла, 3) размер пика таков, что реализовалось одномерное распределение температуры по толщине подложки в области воздействия пика. Установлены связи между размерами и величиной пиковой нагрузки, при которых будет достигаться критический тепловой поток в системе охлаждения зеркала.

Список литературы

1. Кузма-Кичта Ю.А., Комендантов А.С., Оводков А.А., Васильева Л.Т., Сухов Б.Ю. Влияние закрутки потока и пористого покрытия на характеристики теплоотдачи при кризисе теплообмена в каналах с неоднородным нагревом// ТВТ. 1992. Т. 30. № 4. С. 772–777.
2. Boscarya J, Fabrea J, Schlosser J. Critical heat flux of water subcooled flow in one-side heated swirl tubes// International Journal of Heat and Mass Transfer. 1999. Vol.42. No.2. Pp.287-301. DOI:10.1016/S0017-9310(98)00108-2.
3. Варава А.Н., Дедов А.В., Комов А.Т., Малаховский С.А. Экспериментальное исследование кризиса теплообмена при кипении в недогретом закрученном потоке в условиях одностороннего нагрева// ТВТ. 2009. Т. 47. № 6. С. 877–883. DOI:10.1134/S0018151X09060108
4. Кузьмин Ю.А., Харитонов В.В. Предельная допустимая мощность локального источника тепла на поверхности многослойной стенки с внутренним охлаждением// ТВТ. 1986. Т. 24. № 5. С. 948-956.

E.V. Leonov¹, Yu.I. Shanin¹

¹ *LUCH Research and Production Association, Research and Development Institute, Russia, 142103, Podolsk, Moscow region, Zheleznodorozhnaya st., 24*

HEAT TRANSFER CRISIS DURING BOILING IN COOLING SYSTEMS OF LASER MIRRORS

Д. Р. Хорошавцев¹, Р. Е. Ушаков¹, М. О. Доценко¹

¹Московский Государственный Технический Университет им. Н. Э. Баумана,
г. Москва, ushakovre@bmstu.ru

Подход к проведению расчетных и экспериментальных исследований характеристик рабочих колес малоразмерных центробежных компрессоров

Аннотация:

Работа посвящена экспериментальным и расчетным исследованиям характеристик центробежных компрессорных ступеней. Приведены результаты серии экспериментальных исследований характеристик различных ступеней ЦБК на базе электрокомпрессорного стенда. Приведены основные результаты численного расчета методами контрольных объемов течения в ступенях ЦБК. Проведено сравнение полученных расчетных и экспериментальных результатов.

Введение:

Современные тенденции отечественной промышленности нацелены на создание современных энергетических установок, одним из этапов которого является испытание и расчет силовых узлов будущей машины. В связи с этим возникает необходимость в изучении методов получения характеристик исследуемой установки.

Методика верификации результатов:

Испытания рабочих колес замкнутых ГТУ при задачах перепрофилирования является сложной научно-технической задачей, прежде всего из-за необходимости обеспечения герметичности контура и сопоставимости размеров трехканального пневмометрического зонда с высотой рабочей лопатки при выходе из рабочего колеса (2 - 7 мм).

Существенно упростить решение подобной задачи позволяет математическое моделирование течения в рабочем колесе, реализуемое в ПО *ANSYS*. Однако, исследование расчетные характеристики только рабочего колеса, хоть и требует меньшее количество расчетных мощностей, связано с трудоемкостью экспериментальной верификации.

Решением данной задачи может послужить проведение расчета ступени в сборе. То В таком случае открывается возможность для прямого сравнения результатов расчета и эксперимента, а также проведения обоснованной верификации математической модели с последующим получением характеристики рабочего колеса.

Анализ экспериментальных и расчетных данных ступени:

С целью демонстрации данного подхода были проведены расчетные и экспериментальные исследования характеристики ступени ЦБК, результаты которых представлены на рисунке 1.

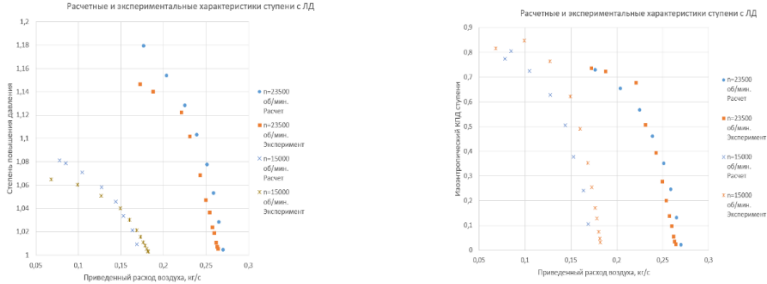


Рисунок 1 Зависимость степени повышения давления от приведенного расхода (слева) и зависимость изэнтропического КПД от приведенного расхода (справа)

Сравнение продемонстрированных выше результатов показывает, что расхождение расчетных и экспериментальных данных не превышает 10% по степени повышения давления и 5% по КПД, что является достаточно для инженерных расчетов точностью и позволяет использовать полученную математическую модель и результатами расчетов для дальнейшего получения характеристики РК.

Calculation and experimental study of the characteristics of small-sized low-pressure stages of centrifugal compressors

D.R. Khoroshavtsev¹, R.E. Ushakov¹, M.O. Dotsenko¹

¹ Bauman Moscow State Technical University (Moscow)

Д. Р. Хорошавцев¹, Р. Е. Ушаков¹, М. О. Доценко¹

¹Московский Государственный Технический Университет им. Н. Э. Баумана,
г. Москва, ushakovre@bmstu.ru

Проектирование рабочего колеса центробежного компрессора замкнутой газотурбинной установки с загнутыми по вращению лопатками

Аннотация:

Работа посвящена исследованию и разработке методики проектирования центробежного колеса с лопатками, загнутыми против вращения. Проведен анализ влияния конструктивного угла при выходе $\beta_{2л}$ на характеристики рабочего колеса (далее РК). В результате расчета колес с варьируемым параметром $\beta_{2л}=105^\circ$, определена оптимальная геометрия. Проведен анализ характеристик колес с выбранными оптимальными параметрами.

Введение:

В настоящее время одним из важнейших вопросов промышленности является создание энергетических машин собственного производства. Разумеется, задача о модернизации существующих газотурбинных установок малой мощности является не менее актуальной и востребованной. В связи с этим возникает необходимость модернизации центробежных компрессоров (ЦБК) при сохранении общих габаритов и конструкции машины. При проектировании замкнутых установок, работающих по тригенерационному циклу, одним из наиболее оптимальных подходов к модернизации рабочего колеса для достижения приемлемой напорности компрессорной ступени при ограниченной частоте вращения является переход к рабочему колесу с лопатками, загнутыми по вращению при выходе.

Проектирование рабочего колеса:

За исходный образец для модернизации было принято рабочее колесо (РК), лопатки которого при выходе загнуты против вращения, а конструктивный угол составляет $\beta_{2л}=65^\circ$. При решении поставленной задачи осуществлялось варьирование конструктивных углов при выходе из РК $\beta_{2л}$ с сохранением формы меридионального обвода и толщины лопаток. При этом угол $\beta_{2л}$ был задан равным 90° и 105° . Полученные трехмерные модели РК с различными конструктивными углами при выходе представлены на рис. 1.

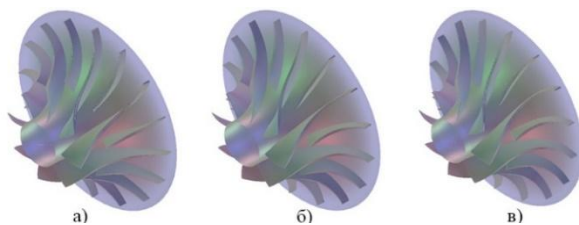


Рисунок 1 Трехмерные модели ПК с некоторыми конструктивными углами при выходе
а) $\beta_{2л}=65^\circ$, б) $\beta_{2л}=90^\circ$, в) $\beta_{2л}=105^\circ$

При этом для ПК с $\beta_{2л}=105^\circ$ была проведена расчетная оптимизация его геометрических параметров методом контрольных объемов в программном комплексе *ANSYS CFX*. В качестве варьируемых параметров были выбраны угол установки лопаток Θ и величина относительного смещения сплиттерных лопаток, а в качестве критерия оптимизации наивысший изэнтропический КПД ПК. В ходе оптимизации были получены зависимости, представленные на рисунке 2,

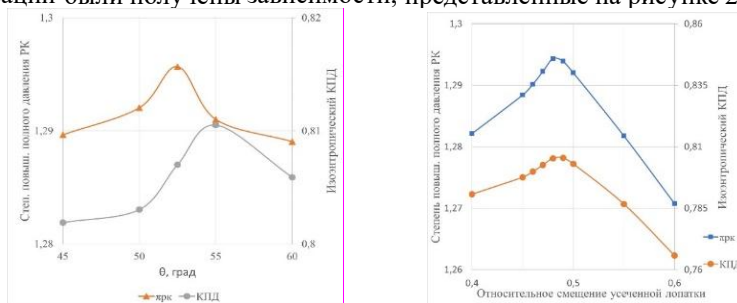


Рисунок 2 Зависимость характеристик ПК от угла установки лопаток (слева) и относительного смещения рабочих лопаток (справа)

Таким образом, согласно полученным выше зависимостям получены наиболее оптимальные геометрические параметры ПК, а именно угол Θ составил 55° , а относительное смещение сплиттерной лопатки – 0,5.

Design of the impeller of a centrifugal compressor of a closed gas turbine installation with blades curved in rotation

D.R. Khoroshavtsev¹, R.E. Ushakov¹, M.O. Dotsenko¹

¹ Bauman Moscow State Technical University (Moscow)

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ	5
Стрижак П.А. Малоинерционная идентификация пожаровзрывоопасных инцидентов по результатам анализа тепломассобменных процессов	6
Исаев С.А. Физические принципы формирования энергоэффективных поверхностей на основе самоорганизации торнадоподобных вихревых структур и экстраординарных перепадов давления	7
Дулин В.М. Моделирование процессов в камерах сгорания ГТД/ГТУ	10
Митрофанова О.В. Вихревой эффект в природе и технике при реализации кризиса закрученного течения	12
Авдеев А.А., Юдин С.М. Аналогия Рейнольдса для кипящих потоков недогретой жидкости	14
Кичатов Б.В., Коршунов А.М. Химический магнетизм как поверхностная сила для перемещения моторов	16
Васильев Н.В. Исследование механизмов высокоинтенсивных процессов теплообмена при кипении недогретой жидкости	17
Терехов В.И., Пахомов М.А. Тепловая эффективность пристенных газокapельных завес. Современное состояние исследований	19
Сафронова Н.Н. Цифровой двойник комплексного процесса вывода из эксплуатации АЭС	21
Сорокин А.П. Экспериментальное и численное моделирование теплообмена при кипении жидкого металла в системе параллельных ТВС в контуре с естественной циркуляцией	23
СЕКЦИЯ 1. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА ПРИ ОДНОФАЗНОЙ КОНВЕКЦИИ	25
Городнов А.О. Температурная стратификация при естественной конвекции газа в тонкостенной емкости при больших неоднородностях температуры	26
Подмаркова А.Д., Засимова М.А., Иванов Н.Г. Анализ эффективности вентиляции при многоструйной подаче приточного воздуха	28
Шалаев В.И., Калугин С.Т., Толоко Г.В. Тепло- и массоперенос в сдвиговых течениях сжимаемого газа	30

Адиатуллин В.Р., Галаев С.А., Иванов Н.Г., Рис В.В.	32
Автоколебательные режимы течения встречных пристенных струй в прямоугольной полости	
Шашкин Г.А., Астанина М.С., Шеремет М.А. Использование различных подходов к моделированию процессов конвективного теплообмена в частично пористой двумерной полости	34
Агеев Д.Э., Засимова М.А. Исследование свободной конвекции воздуха около одиночной горизонтальной оребренной трубы	36
Семенюк Д.С., Листратов Я.И. Влияние неоднородного магнитного поля на течение ртути в канале с конвекцией	38
Кучиев Д.Ю., Смирновский А.А., Смирнов С.И. Численное моделирование турбулентной свободной конвекции в слое с объемным тепловыделением при помощи LES и RANS подходов	40
Михайлов Е.А., Поздеева И.Г., Степанова А.П., Тепляков И.О., Тихонова А.С., Хасаева Т.Т. Электровихревое течение проводящей жидкости в осесимметричном цилиндре при различном расположении электродов	42
Панкратов Е.В. Исследование аэродинамики и теплообмена закрученного потока с парной спирально-вихревой структурой в кольцевом канале	44
Шенягин Е.М., Лучинкин Н.А., Беляев И.А. Экспериментальное исследование свободной конвекции в жидком металле вблизи вертикального цилиндра в магнитном поле	46
Белавина Е.А., Рахимов Р.Ф., Пятницкая Н.Ю. Смешанная конвекция имитатора расплава соли в условиях действия магнитного поля	48
Бабич Е.В., Колесник Е.В. Исследование структуры течения и локального теплообмена при сверхзвуковом обтекании цилиндра, ограниченного с торцов параллельными пластинами	50
Карнозова Е.А., Попович С.С. Термографическое исследование тепловых потоков в высокоскоростных течениях за ударными волнами	52
Кадыров Р.Г., Попов И.А. Течение и теплообмен в пучках труб различной формы и компоновки	54
Поздеева И.Г. Использование растворов электролитов для экспериментального моделирования электро-вихревых течений	56

Плотников Л.В., Шурупов В.А., Красильников Д.Н., Давыдов Д.А. Влияние конструкции клапанного узла на газодинамику и теплообмен потока газа в цилиндре двигателя в процессе впуска	58
Астанина М.С., Шеремет М.А. Численное исследование процессов свободной конвекции в кубической полости с пористым слоем в рамках тепловой локально-неравновесной модели с использованием двух типов граничных условий	60
Кучкарова М.Р., Шакиров Р.Р., Михеев Н.И. Ламинарно-турбулентный переход в пульсирующем потоке	62
Пашкова Н.Д., Молочников В.М., Никифоров И.В. Ламинарно-турбулентный переход закрученного потока в гладком канале	64
Балабаев Н.Е., Лучинкин Н.А., Беляев И.А. Экспериментальное исследование влияния электрической проводимости стенки на образование магнитно-конвективных пульсаций потока в вертикальных каналах	66
Гибанов Н.С., Шеремет М.А. Разработка гибридного подхода для решения задач смешанной конвекции в каналах с нагревательными элементами и рёберной системой охлаждения на основе метода конечных разностей и решеточного метода Больцмана	68
Киселёв Н., Маластовский Н. Исследование эффекта Эккерта-Вайса при поперечном обтекании пары круговых цилиндров сжимаемым потоком воздуха	70
Михеев Н.И. Динамически неравновесные процессы: научные основы и инженерные приложения	72
Поляков П.И., Тепляков И.О. Электровихревые течения в сосудах вращения при переменном токе	74
Загайнов И.А., Попович С.С. Экспериментальное исследование теплоотдачи в отрывных течениях сжимаемого газа	76
Загайнов И.А., Попович С.С. Постановка задачи экспериментального исследования энергоразделения Гартмана-Шпренгера	78
Щелоков С.Л., Васильевский С.А., Колесников А.Ф. Численное исследование дозвуковых струй высокосэнталийного воздуха в области рабочих параметров ВЧ-плазмотрона ВГУ-4	80
Корскова Т.С., Засимова М.А. Численное исследование перемешивания воздуха в вентилируемом пространстве при подаче приточной струи через осциллятор	82

Руденко Ю.К., Пуштаев А., Винниченко Н.А., Плаксина Ю.Ю., Уваров А.В. Исследование свойств межфазных поверхностей с помощью локального ИК-нагрева	84
Оришина В.А., Панкратов Е.В. Исследование аэродинамического сопротивления закрученного потока с парной спирально-вихревой структурой в кольцевом канале	86
СЕКЦИЯ 2. ТЕПЛО- И МАССООБМЕН В ДВУХФАЗНЫХ И МНОГОФАЗНЫХ ПОТОКАХ	89
Ряжских А.В., Соболева Е.А., Хвостов А.А. Влияние полидисперсности наночастиц на теплопроводность наножидкостей	90
Судуров А.А. Определение проводимости пульсирующей тепловой трубы методом решения обратной задачи	92
Мильман О.О., Железнов А.П., Птахин А.В., Яньков Г.Г., Картуесова А.Ю., Крылов В.С. Влияние наклона трубы на теплообмен при полной конденсации фреона R245FA в трубе	94
Арестова А.А., Олексюк Д.А., Вертиков Е.А. Сравнение равнообъемной и равномассовой моделей межканального обмена в ячейковой программе SC-INT	96
Акашев А.А., Решетников А.В., Пастухов В.Г. Зондирование поля давления в окрестности струи в условиях её полного развала	98
Сахаров А.А., Емец А.А. Экспериментальная установка для исследования конденсации пара на распыляемую жидкость.	100
Клементьев А.А., Минко К.Б. Модификация интегральной модели жидкой пленки на основе результатов моделирования пленочной конденсации методом VOF	102
Судаков В.С. Перемещение капель в эмульсии с помощью магнитных наночастиц	104
Шурупов В.А., Бусов К.А. Изучение динамики вскипания струи перегретой воды при её истечении через короткие каналы различной формы	106
Гроо Д.А., Коновалов Д.А. PIV-диагностика диспергированного теплоносителя	108
Евко Е.А., Пузина Ю.Ю. Колебания межфазной поверхности при кипении сверхтекучего гелия в U-образном канале с использованием монодисперсной засыпки диаметром 70 мкм	110

Колесник Е.В., Зайцев Д.К., Смирнов Е.М. Моделирование методом VOF процессов пленочной конденсации на вертикальной пластине	112
Шепелев И.И., Федоров Р.В., Малешина М.А. Исследование возможностей и условий направленного формирования кластеров дисперсной фазы рабочего тела посредством воздействий	114
Евдокименко И.А., Филиппский К.А., Лобанов П.Д., Чинак А.В. Влияние способа организации отрывного пузырькового потока на теплообмен в прямоугольном канале при малом газосодержании	116
Какаулин С.В., Кабардин И.К., Гордиенко М.Р. Исследование энергоэффективности традиционных методов защиты ветрогенераторов от обледенения	118
Ивочкин Ю.П., Юдин С.М. Исследование особенностей протекания маломасштабных паровых взрывов легкоплавких металлов	120
СЕКЦИЯ 3. ТЕПЛО- И МАССООБМЕН В УСЛОВИЯХ ХИМИЧЕСКИХ ПРЕВРАЩЕНИЙ, ГОРЕНИЕ	123
Тарасов А.В., Веретенников С.В., Благушин И.А. Исследование возможности организации горения в противоточной вихревой трубе	124
Асикритов А.А., Гурьянов А.И. Исследование газодинамики течения воздуха и характеристик турбулентности в камере сгорания МГТД	126
Трегуб Д.С., Мельников И. Об эффекте процесса коррозии для анализа удержания расплава внутри корпуса	128
Арефьев К.Ю., Гуськов О.В., Мамышев Д.Л. Анализ влияния разных способов подачи водорода на параметры высокоскоростного реагирующего потока в модельном тракте	130
Матяш Е.С., Евдокимов О.А. Формирование структуры противоточных закрученных струй для интенсификации горения топлива	132
Садикова Е.В., Пашкевич Д.С., Капустин В., Федорова Т.А. Расчёт параметров теплового взрыва для процесса фторирования этилена и фторэтанов трифторидом кобальта на основе разработанных кинетических моделей этих процессов	134
Белоножко И.Д., Сергеев М.Н. Взрывной распыл топлива при воздействии СВЧ излучения на радиопоглощающие присадки	136
Бурцев И.А., Репетий Н., Коновалов Д.А. Выбор параметров оптимизации при математическом моделировании процесса газификации RDF-топлива	138

Воробьев И.О., Евдокимов О.А. Изучение структуры течения и пламени в вихревом противоточном горелочном устройстве	140
Благушин И.А., Веретенников С.В., Тарасов А.В. Исследование акустического излучения при сжигании газообразного топлива в противоточном закрученном течении	142
Гурьянов А.И., Титова И.И., Соколов П.А. Формирование закрученных воздушных потоков в противоточном горелочном устройстве	144
Веселов К.Е., Евдокимов О.А. Численное моделирование распада струи жидкости в поперечном потоке воздуха	146
Лавронов К.Д., Шараборин Д.К., Толстогузов Р.В., Дулин В.М. Экспериментальное исследование пламени Бунзена в слабом электрическом поле панорамными оптическими методами	148
Малешина М.А., Ковальногов В.Н., Шеркунов В.В. Моделирование горения водородосодержащего топлива	150
Мазур О.М., Евдокимов О.А. Изучение режимов горения противоточной вихревой горелки с полусферической камерой смешения	152
Заводова О.С., Сургучев С.А., Гурьянов А.И., Евдокимов О.А. Интенсификация горения в противоточном закрученном течении путем предварительной ионизации окислителя	154
Колганов П.А., Евдокимов О.А. Стабилизация пламени на массиве противоточных закрученных струй	156
Заводова О.С., Сургучев С.А., Иванов Р.И. Использование особенностей противоточного закрученного течения для сжигания безуглеродного топлива	158
Федорова Т.А., Пашкевич Д.С., Попов П. Численное исследование процесса реконверсии обедненного гексафторида урана в режиме горения	160
Руслан Х.Р., Сыченков В.А., Юсупова С.А. Особенности внутрикамерных процессов двухзонной камеры сгорания малоразмерного газотурбинного двигателя	162
Тропин Я.В., Рашковский С.А. Численное моделирование полей температур в кольцевой камере сгорания турбореактивного двухконтурного двигателя с форсажной камерой (ТРДДФ)	164
Евдокимов О.А. Газодинамика и горение в массивах противоточных закрученных струй	166

СЕКЦИЯ 4. РАДИАЦИОННЫЙ, СЛОЖНЫЙ И СОПРЯЖЕННЫЙ ТЕПЛООБМЕН, В ТОМ ЧИСЛЕ ДИСПЕРСНЫЕ ПОТОКИ И ПОРИСТЫЕ СРЕДЫ	169
Мошин А.А., Храмцов Д.П., Захаров Н.С., Некрасов Д.А., Михайлова И.А. Особенности теплообмена в гидрогелях модифицированных графеном и наноалмазами применительно к технологиям 3D-биопечати	170
Сафронов А.А., Коротеев А.А., Филатов Н.И. Радиационное остывание немонодисперсного капельного потока в бескаркасных системах отвода низкопотенциального тепла в космосе	172
Павлов Д., Захаров В., Алибаев А.Ф., Нечипорук С.Ю. Влияние параметров сопряжения при моделировании нестационарного прогрева стенок газового канала при псевдоскачковом типе течения	174
Заграй И.А., Кузьмин В.А., Лоншаков А.С. Опытнo-теоретическое определение температуры и излучательной способности частиц конденсированной фазы при факельном сжигании твердых топлив	176
Чан К., Михайлова И.А. Разработка и оптимизация конструкции солнечного испарителя на основе графеновых хлопьев для эффективного испарения и опреснения	178
СЕКЦИЯ 5. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАСООБМЕНА	181
Алибаев А.Ф., Захаров В., Нечипорук С.Ю., Павлов Д. Нейросетевая суррогатная модель процесса конвективного теплообмена канале сложной формы	182
Мильман О.О., Птахин А.В., Перов В.Б., Кудинов В.В., Крылов В.С., Железнов А.П. Экспериментальное исследование характеристик системы аварийного расхолаживания атомного реактора	184
Третьяков А.Р., Сергеев М.Н. Влияние ультразвука на качество изготовления магнитной жидкости	186
Федюшкин А.И. Интенсификация тепломассопереноса при выращивании монокристаллов	188
Чукалин А.В., Савёлов О.В., Петров А.В. Исследование влияния демпфирующей поверхности и комбинированных систем управления на характеристики пограничного слоя	190
Коёкин В.Ю., Булович С.В. Интенсификация теплообмена при нестационарном течении в трубе	192

Гембаржевский Г.В. О простой модели турбулентного комплексного следа от цилиндров	194
Паторкин Д.В., Максимов И.А., Киндра В.О. Исследование влияния геометрических характеристик на теплогидравлические процессы в конфузорно-диффузорных каналах	196
Островская Д.В., Маршалова Г.С., Данильчик Е.С. Влияние внешнего загрязнения на конвективную теплоотдачу однорядного пучка из оребренных труб с вытяжной шахтой	198
Воробьев Д.В., Макаров П.Г., Михайлова И.А. Исследование и оптимизация мощностных характеристик термоэлектрических модулей	200
Швецов Д.А., Павленко А.Н., Жуков В.И. Теплообмен при кипении в горизонтальных слоях диэлектрической жидкости на градиентных сетчатых покрытиях	202
Малешин И.А., Ковальногов В.Н., Генералов Д.А. Исследование возможностей газодинамической температурной стратификации для интенсификации процесса горения	204
Митрофанова О.В., Поздеева И.Г., Старовойтов Н.А. Спирально-винтовая структуризация закрученного потока при переходе к резонансному режиму течения	206
Филиппов М.Д., Беляев А.В., Дедов А.В. Исследование интенсификации кипения на плоской поверхности	208
Филиппов М.Д., Дедов А.В. Исследование интенсификации теплообмена при кипении на структурированных поверхностях	210
Малеваный М.В., Коновалов Д.А., Крылова Е.В. Экспериментальные исследования охлаждения поверхности при помощи теплообменников с неоднородной пористой средой	212
Ковальногов В.Н., Рудник Р.С., Матвеев А.Ф. Исследование параметров течения в трубе Леонтьева для повышения энергоэффективности компримирования газа	214
Петухов С.С., Верещагин А.Ю., Новожилова А.В. Исследование свободно-конвективной теплоотдачи шестирядного пучка из биметаллических ребристых труб	216
Нечипорук С.Ю., Захаров В.С., Алибаев А.Ф., Павлов Д.А. Исследование эффективности удаления пограничного слоя при обтекании плоской перфорированной пластины	218

Ван Ч., Мурашов М.В. Разработка методики управления контактной тепловой проводимостью с применением заданных профилей шероховатости	220
СЕКЦИЯ 6. ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ ТЕПЛОМАСООБМЕНА	223
Тепляков И.О., Виноградов Д.А. Течения жидкого металла, инициированные электрическим током	224
Бездудный А.В., Дуников Д.О., Блинов Д.В. Одноступенчатая система хранения тепловой энергии на базе МГ-технологии	226
Гриненко А.С., Ненарокомов А.В., Ревизников Д.Л., Николичев И. Аэротермодинамический анализ и тепловое проектирование космического корабля для маневрирования в атмосфере	228
Здитовец А.Г. Труба Леонтьева	230
Мошин А.А., Покусаев Б.Г., Голованов И.Ю., Храмцов Д.П., Михайлова И.А. Совершенствование аппаратурного оформления тепло- и массообменных процессов в гидрогелях с микроорганизмами	232
Чукалин А.В., Ковальногов В.Н. Моделирование и исследование обменных процессов в турбулентном следе ветроэнергетических установок	234
Котляр А.А., Веретенников С.В., Колесова Е.Г., Евдокимов О.А. Исследования влияния относительного шага между отверстиями на эффективность газовой завесы	236
Васильев А.А., Булович С.В. Численное моделирование процессов в акустическом двигателе Стирлинга	238
Григорьев А.Р., Мурашов М.В. Разработка автоматизированной системы измерения контактной теплопроводности твёрдых тел в вакууме	240
Шматков А.П., Макаров П.Г. Термофлотационное всплытие частиц полидисперсной засыпки в недогретой жидкости	242
Ряжских В.И., Краснов А.А. Аналитическое решение классической задачи о перекрестноточном одноходовом пластинчатом теплообменнике при охлаждении тепловыделяющей жидкости	244
Попова Д.К., Кортиков Н.Н. Моделирование нестационарных процессов в охлаждаемой ступени турбины на основе метода гармонического баланса	246
Балакин Д.Ю., Аронсон К.Э. Моделирование динамики пароструйного эжектора при работе на сухом воздухе	248

Блинов Д.В., Бездудный А.В., Дуников Д.О., Еронин А.А. Установка для твердофазного обратимого хранения водорода в гидридах металлов	250
Дуников Д.О., Блинов Д.В., Серов Б.С. Очистка водорода из природных источников с помощью металлгидридов	252
Смирнов Д.С., Веретенников С.В., Крупин В. Методика расчета теплообмена в слабовентилируемых вращающихся полостях ротора КВД с учетом влияния перетечек воздуха	254
Смирнов Д.С., Веретенников С.В. Расчет СА ТВД ГТД со встроенными вихревыми трубами	256
Борисенко И., Нетелев А.В. Определение коэффициента аккомодации при взаимодействии лобового тормозного экрана с набегающим потоком	258
Колесников М.А., Попов И.А. Численное и натурное моделирование турбокомпрессора дизельного двигателя	260
Смирнов К.И., Попов И.А. Численное моделирование системы впуска дизельного двигателя	262
Попов И.А., Попов И.А. Численное моделирование системы смазки дизельного двигателя	264
Носков С.Л., Генералов Д.А., Шепелев И.И., Моделирование энергоэффективных процессов при очистке сточных вод ТЭС	266
Кузнецов В.И., Антаненкова И.С. Коэффициенты теплоотдачи фреонов при конденсации в кожухотрубных аппаратах	268
Кустиков Ю.В., Веретенников С.В., Богданов В.И. Методы повышения мощности ГТД	270
Знамеровский М.Д., Петров Л. Моделирование изменения теплогидравлических параметров парогазовой среды в защитной оболочке на примере эксперимента CASP3	272
Коротков М.С., Скрыбиков С.В., Гобызов О.А., Амосов К.А. Оптические системы скоростной панорамной диагностики	274
Коновалова М.Д., Орехова М.Т., Кожухов Н.Н. Определение эффективной конфигурации оребрения для систем с низкопотенциальным энерговыделением	276
Гладилин Н.Д., Шеркунов В.В., Ковальногов В.Н. Комбинированный подход к оптимизации работы энергетического оборудования электростанций с применением машинного обучения	278

Старовойтов Н.А., Митрофанова О.В., Поздеева И.Г. Закономерности развития резонансных явлений в закрученных течениях в каналах судовых ядерных энергетических установок	280
Артюшенко Д.В., Муравьева В.С., Алексеев П.Д., Леухин Ю.Л. Методика теплового расчета струйного модульного рекуператора	282
Диденко Р.А. Моделирование, диагностика и предотвращение вращающегося срыва в осевом многоступенчатом компрессоре	284
Сиротин Ф.В., Ковальногов В.Н. Моделирование процесса кристаллизации алюминиевого сплава при непрерывном литье	286
Леонов Е.В., Шанин Ю.И. Кризис теплообмена при кипении в системах охлаждения лазерных зеркал	288
Хорошавцев Д.Р., Ушаков Р.Е., Доценко М.О. Подход к проведению расчетных и экспериментальных исследований характеристик рабочих колес малоразмерных центробежных компрессоров	290
Хорошавцев Д.Р., Ушаков Р.Е., Доценко М.О. Проектирование рабочего колеса центробежного компрессора замкнутой газотурбинной установки с загнутыми по вращению лопатками	292