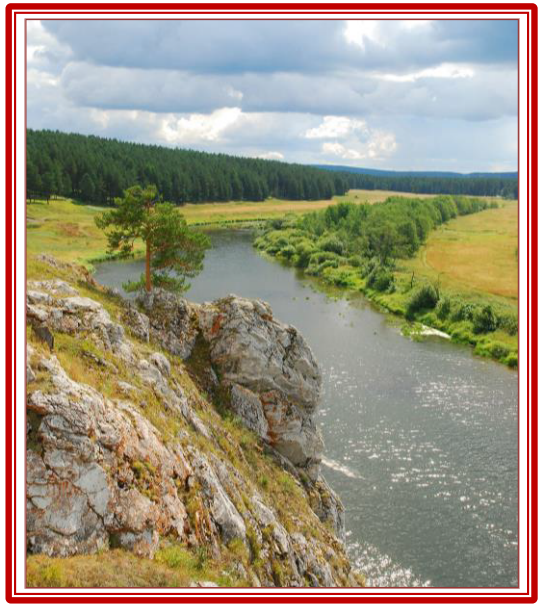
ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

ПРОБЛЕМЫ ГАЗОДИНАМИКИ И ТЕПЛОМАССООБМЕНА В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

XXIII Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева

XXIII Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева

ПРОБЛЕМЫ ГАЗОДИНАМИКИ И ТЕПЛОМАССООБМЕНА В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ



24–28 мая 2021 года
г. Екатеринбург, Россия

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Организаторы

XXIII Школы-семинара
молодых учёных и специалистов
под руководством
академика РАН А.И. Леонтьева:

Российская академия наук

Отделение энергетики, машиностроения,
механики и процессов управления

Национальный комитет РАН
по тепло- и массообмену

Институт теплофизики
Уральского отделения РАН

EXTENDED ABSTRACTS

of the XXIII School-Seminar
of Young Scientists and Specialists
under supervision of Professor A.I. Leontiev,
Academician of the Russian Academy of Sciences

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

May 24 - 28, 2021
Ekaterinburg, Russia

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

XXIII Школы-семинара
молодых ученых и специалистов
под руководством
академика РАН А.И. Леонтьева

ПРОБЛЕМЫ ГАЗОДИНАМИКИ И ТЕПЛОМАССООБМЕНА В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

24 - 28 мая 2021
г. Екатеринбург, Россия

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. – 362 с.

ISBN 978-5-907297-86-9

Представлены тезисы лекций и докладов по тепло- и массообмену в дисперсных и пористых средах, по методикам экспериментов, численному моделированию, по конвективному теплообмену, теплообмену при фазовых превращениях, интенсификации процессов теплообмена, по тепломассопереносу при химических реакциях, по метастабильным состояниям и флуктуационным явлениям и др.

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

ISBN 978-5-907297-86-9

©Национальный комитет РАН
по тепло- и массообмену
Институт теплофизики УрО РАН
Составление, 2021
© Авторы, 2021

Дорогие друзья и коллеги!

XXIII Школа-семинар молодых ученых и специалистов «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» в этот раз проходит на Уральской земле, прославленной трудами первых русских промышленников Демидовых, изобретателя паровой машины И.И. Ползунова, автора уральских сказов П.П. Бажова.

В программу XXIII Школы-семинара включены более 200 докладов, из них около 25 лекций ведущих российских учёных теплофизиков.

По традиции нашей Школы основной акцент будет сделан на детальном обсуждении секционных стендовых докладов с выбором трех лучших по каждой из шести секций и награждением дипломами и призами на процедуре закрытия Школы-семинара.

Огромная благодарность директору Института теплофизики УрО РАН – Андрею Владимировичу Виноградову, Светлане Юрьевне Елиной, а также другим сотрудникам ИТФ УрО РАН за гостеприимство и четкую работу по организации XXIII Школы-семинара.

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

Лауреат премии «Глобальная энергия» и премии Правительства РФ в области науки и техники

академик
А.И. Леонтьев

СЕКЦИИ XXIII ШКОЛЫ-СЕМИНАРА

СЕКЦИЯ 1	**Тепло- и массообмен при однофазной конвекции**
Сопредседатели	*профессор **В.И. Терехов** (Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН),* *профессор **С.А. Исаев** (Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации)*
СЕКЦИЯ 2	**Метастабильные состояния и флуктуационные явления**
Сопредседатели	*член-корр. РАН **А.В. Дедов** (НИУ "Московский энергетический институт"),* *д.ф.-м.н. **А.В. Виноградов** (Институт теплофизики УрО РАН)*
СЕКЦИЯ 3	**Тепло- и массообмен в двухфазной и многофазной средах**
Сопредседатели	*член-корр. РАН **А.Н. Павленко** (Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН),* *к.т.н. **Б.М. Гасанов** (Институт теплофизики УрО РАН)*
СЕКЦИЯ 4	**Сложный тепломассообмен и пористые среды**
Сопредседатели	*профессор **И.В. Деревич** (Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана),* *д.ф.-м.н. **А.В. Решетников** (Институт теплофизики УрО РАН)*
СЕКЦИЯ 5	**Химические превращения и тепломассообмен**
Сопредседатели	*профессор РАН **А.Ю. Снегирёв** (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого),* *д.т.н. **А.И. Гурьянов** (Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьева)*
СЕКЦИЯ 6	**Прикладные задачи тепломассообмена: интенсификация и эффективность**
Сопредседатели	*академик **Д.М. Маркович** (Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН),* *член-корр. РАН **А.Ю. Вараксин** (Объединенный институт высоких температур РАН)*
КРУГЛЫЙ СТОЛ	**Численные методы в теории тепломассообмена**
Сопредседатели	*д.ф.-м.н. **С.А. Исаев** (Санкт Петербургский государственный университет гражданской авиации),* *д.ф.-м.н. **М.А. Шеремет** (Национальный исследовательский Томский государственный университет)*

СЕКЦИЯ 1

Тепло- и массообмен при однофазной конвекции

УДК 532.517

О.В. Митрофанова[1,2]

[1] Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва, Каширское ш., 31
[2] Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

МЕХАНИЗМЫ АККУМУЛЯЦИИ ЭНЕРГИИ КРУПНОМАСШТАБНЫМИ ВИХРЕОБРАЗОВАНИЯМИ

Необходимость изучения механизмов вихревой генерации и аккумуляции энергии крупномасштабными вихреобразованиями связана с актуальной проблемой развития методов физико-математического моделирования для возможности предсказания катастрофических техногенных и природных явлений. Обобщение экспериментальных данных по выявлению топологических особенностей и закономерностей закрученных течений в различных технических устройствах и в природных явлениях указывает на их идентичную физическую природу.

В настоящей работе показано, что вопрос о вихревой структуризации текучих сред неразрывно связан с термодинамикой кризисных явлений, обуславливающих переход системы к устойчивому, энергетически более выгодному состоянию. Согласно [1], условием термодинамического равновесия гидромеханической системы является минимум термодинамического потенциала – энергии Гиббса Ф. Возникновение в движущейся текучей среде устойчивой детерминированной вихревой структуры потока под действием массовых сил, приводит к нарушению симметрии однородной среды, поэтому в описание термодинамических потенциалов энергии Гиббса Ф и внутренней энергии U необходимо вводить члены, связанные с параметром порядка, характеризующим степень асимметрии среды из-за образования упорядоченной структуры. При этом убыль значения потенциала Гиббса компенсируется возрастанием «скрытой» внутренней энергии системы [2].

Проблема исследования механизмов аккумуляции энергии крупномасштабными вихрями приобретает особую актуальность в плане изучения проблем изменения климата для понимания геофизических явлений, связанных со сложным вихревым движением атмосферы и океана. Эксперименты и теоретический анализ [3] показывают, что действие этих механизмов обусловлено взаимозависимостью электрического, магнитного и вихревого полей и их совокупным влиянием на процессы аккумуляции и переноса энергии в спирально-вихревых структурах.

Подобие топологии наблюдаемых вихреобразований, фиксируемых в двух противоположных процессах аккумуляции и диссипации энергии при образовании крупномасштабных вихрей, как это показано на

рис. 1 а, б, указывает на существование критических условий, соответствующих предельному состоянию открытой термодинамической системы с вихревой локализацией энергии.

а)

б)

Рис. 1. Примеры высокоэнергетичных вихреобразований:
а) - «ядерное» торнадо в штате Вайоминг США 6 июня 2018, похожее на грибовидное облако после ядерного взрыва; б) - грибовидное облако, образованное в результате атомного взрыва испытания «Траки», проводимого в рамках проекта «Доминик», июнь 1962 г., остров Рождества, 3 мегатонны

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований, грант № 19-08-00223 и Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ (Договор No. 02.a03.21.0005).

Список литературы

1. **Новиков И.И.** Термодинамика спинодалей и фазовых переходов. М.: Наука. 2000. 165 с.
2 **O.V. Mitrofanova** Generation of deterministic eddy structure of the flow as an analogue of the phase transition of the second kind. Development of ideas of academician I.I. Novikov // MATEC Web of Conferences, 2017 Vol. 115, 04002, https://doi.org/10.1051/matecconf/201711504002
3. **О.В. Митрофанова**. Исследование механизма генерации крупномасштабного вихревого движения в электропроводных средах // Теплофизика высоких температур, 2015, Т. 53, № 6, С. 891-899.

O.V. Mitrofanova[1,2]

[1] National Research Nuclear University MEPhI, 115409, Moscow, Kashirskoe sh.,31
[2] National Research Center "Kurchatov Institute",
123182, Moscow, pl. Academician Kurchatov, 1

MECHANISMS OF ENERGY ACCUMULATION BY LARGE-SCALE VORTEX FORMATIONS

УДК 536.2+532.556

Н.И. Михеев[*], *Р.Р. Шакиров, И.А. Давлетшин*

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

КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН И ТУРБУЛЕНТНОСТЬ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКОЙ НЕРАВНОВЕСНОСТИ ТЕЧЕНИЯ В КАНАЛЕ

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.

Традиционное представление характеристик турбулентности в координатах закона стенки с нормированием по локальной динамической скорости в условиях динамической неравновесности дает труднообъяснимые профили турбулентных характеристик потока с аномально высокими или низкими значениями энергии турбулентности, зачастую имеющие несколько локальных экстремумов. Наши систематизированные опытные данные свидетельствуют о том, что на профиль турбулентности в канале с динамическими воздействиями на поток влияют не столько локальные условия обтекания стенки, сколько конвекция и диффузия турбулентности.

С использованием нового 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. Так, в диффузорном канале генерация турбулентности преобладает в пристеночной части в высокоскоростной области, откуда распространяется за счет конвекции ниже по потоку и выравнивается по сечению путем диффузии турбулентности. При этом удельная энергия турбулентности вниз по потоку не только не увеличивается, но и существенно снижается, т.е. в целом в диффузорном канале средняя по сечению диссипация энергии турбулентности преобладает над генерацией. Другими словами, высокая интенсивность турбулентных пульсаций в толстом пристеночном слое, которую мы видим при нормировании характеристик турбулентности

по локальной динамической скорости, формируется не в рассматриваемом сечении, а выше по потоку. Энергия образовавшихся выше по потоку турбулентных вихрей на временном масштабе движения в диффузоре диссипирует сравнительно медленно и оказывается выше энергии вихрей, вновь образующихся в низкоскоростной области.

Для градиентных течений установлена тесная корреляционная связь между локальным числом Стантона и максимумом рейнольдсовых напряжений в локальной области стенки. Получены экспериментальные данные по связи локального коэффициента теплоотдачи с гидродинамическими характеристиками при обтекании поперечного выступа пульсирующим потоком [2]. Установлено, что теплообмен в ближнем следе за выступом весьма чувствителен к колебаниям потока с относительной частотой fh/u порядка 0.1. При всей сложности и многообразности перестройки структуры течения в условиях вынужденных колебаний потока ключевую роль в интенсификации теплоотдачи играет организованное крупномасштабное вихревое движение теплоносителя, инициированное под влиянием вынужденных колебаний потока, которое интенсифицирует перенос массы теплоносителя в поперечном направлении.

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). https://doi.org/10.1134/S0020441216060063
2. **Davletshin I.A., Mikheev A.N., Mikheev N.I., Shakirov R.R.** Heat transfer and structure of pulsating flow behind a rib // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, Vol. 160 120173.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-19-00355). Частично использованы результаты по теплообмену, полученные при поддержке РФФИ (проект 19-08-00421).

N.I. Mikheev, R.R. Shakirov, I.A. Davletshin

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

CONVECTIVE HEAT TRANSFER AND TURBULENCE IN CONDITIONS OF DYNAMICAL NON-EQUILIBRIUM OF CHANNEL FLOWS

УДК 536.2

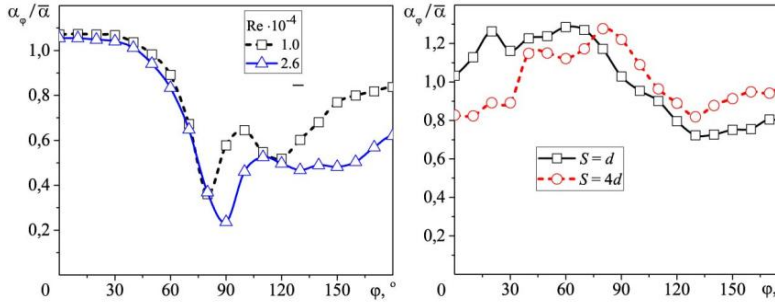
А.В. Митяков, М.А. Греков, А.А. Гусаков, В.В. Сероштанов

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

ТЕЧЕНИЕ И ТЕПЛООБМЕН ВБЛИЗИ РЯДА ЦИЛИНДРОВ

При создании трубчатых теплообменников важно располагать данными, описывающими связь течения и теплообмена. Наиболее востребованными в этой области являются экспериментальные методики и работы, где параметры течения и теплообмена измеряют в ходе единого эксперимента [1]. Представлены результаты совместного исследования течения и теплообмена вблизи одиночного, а также нескольких круговых цилиндров, расположенных друг за другом на различном расстоянии. Визуализация течения проводилась с помощью PIV (Particle Image Velocimetry), а плотность теплового потока была измерена методом градиентной теплометрии.

Модели – полые цилиндры – обогревались насыщенным водяным паром при атмосферном давлении. На исследуемом цилиндре был установлен градиентный датчик теплового потока (ГДТП) из монокристаллического висмута [2]. Цилиндр проворачивался вокруг оси на азимутальный угол φ. Схема позволила получить распределение плотности теплового потока по периметру модели.



а) б)

Рис. 1. Распределения местных безразмерных коэффициентов теплоотдачи по углу поворота φ для одиночного цилиндра (а) и для второго цилиндра в случае обтекания пары при числе Рейнольдса Re =$1\cdot10^4$ (б).

Расстояние между цилиндрами S менялось в пределах от 0,5 до 4 калибров d. Опыты проводились в диапазоне чисел Рейнольдса от 400 до $8\cdot10^4$. В каждом опыте измерялась температура набегающего потока, а температура поверхности цилиндров поддерживалась постоянной

и близкой к 100 °С. Это позволило рассчитать местные и осредненные коэффициенты теплоотдачи (КТО) по данным градиентной теплометрии и термометрии. На рисунке 1 представлены распределения местных КТО, отнесённых к среднему их значению, от угла поворота φ. Распределения для одиночного и второго в паре цилиндров отличаются. Для одиночного цилиндра КТО изменяется в пределах от 0,2…0,3 до 1,1, а его минимум находится в области отрыва пограничного слоя. Распределение КТО на поверхности второго цилиндра меняется менее выраженно, а его максимум зависит от расстояния между цилиндрами *S*.

Данные теплометрии дополнялись мгновенными и осредненными по времени полями скорости вблизи цилиндров, полученными с помощью PIV. Сопоставление полей скорости и теплограмм (зависимостей плотности теплового потока от угла φ) [2] позволяет выявить особенности течения и теплообмена вблизи обогреваемых цилиндров. Таким образом, методика, основанная на совместном применении градиентной теплометрии, термометрии и PIV, и полученные результаты служат основой для изучения течения и теплообмена в пучках труб и интенсификации теплообмена при сохранении приемлемых гидродинамических параметров.

Список литературы

1. **D. Sumner**, Two circular cylinders in cross-flow: A review, Journal of Fluids and Structures, 10.1016/j.jfluidstructs.2010.07.001, 26, 6, (849- 899), (2010).
2. **Sergey Z. Sapozhnikov, Vladimir Yu. Mityakov, Andrey V. Mityakov** // Heatmetry The Science and Practice of Heat Flux Measurement // Springer International Publishing, 2020.

A.V. Mityakov, M.A. Grekov, A.A. Gusakov, V.V. Seroshtanov

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

FLOW AND HEAT TRANSFER NEAR A ROW OF CYLINDERS

УДК 536.2

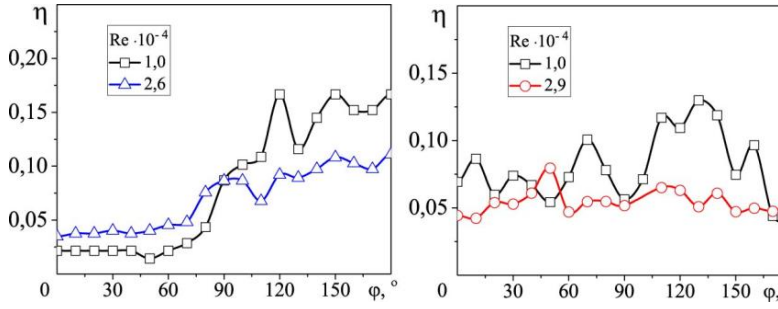
В.Ю. Митяков, В.В. Сероштанов, А.С, Власов, В.В. Сучок, Н.А. Жидков

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

ИНТЕНСИВНОСТЬ ПУЛЬСАЦИЙ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА ПРИ ОБТЕКАНИИ КРУГОВОГО ЦИЛИНДРА

Исследование поперечного обтекания обогреваемых круговых цилиндров ведутся давно и успешно. В экспериментах измеряли статическое давление и температуру на поверхности цилиндра, различными способами (PIV, SIV, LDA и т.д.) визуализировали поле скорости вблизи цилиндра. Изучались как осредненные по времени, так и мгновенные величины, однако наиболее распространённым при оценке нестационарного обтекания цилиндра являлся метод термоанемометрии [1]. Постоянная времени зонда тероманемометра (около 1 мс) позволяет измерять пульсации скорости. При течении вблизи плохо обтекаемых тел обычно измеряют частоту схода вихрей [1].

В нашей работе пульсации плотности теплового потока на поверхности кругового цилиндра исследованы методом градиентной теплометрии. Градиентные датчики теплового потока (ГДТП) имеют постоянную времени, сопоставимую с нитью термоанемометра и ниже (до 10 нс) [2]. В работе использован ГДТП из монокристаллического висмута размерами 2×2×0,2 мм, установленный на поверхности цилиндра диаметром 66 мм, обогреваемого насыщенным водяным паром. Эксперименты проводились для чисел Рейнольдса от 400 до $80 \cdot 10^3$ для одиночного цилиндра и для пары цилиндров, установленных один за другим по потоку. Исследуемый цилиндр мог проворачиваться вокруг оси, при этом установленный на его поверхности ГДТП фиксировал плотность теплового потока на каждом азимутальном угле φ. Сигнал ГДТП измерялся с частотой 100 Гц. На рисунке 1 представлены интенсивность пульсаций теплового потока; здесь $\bar{q}_\varphi$ и $\sqrt{q'^2_\varphi}$, Вт/м^2 – средняя плотность теплового потока и среднеквадратичное значение пульсаций плотности теплового потока при фиксированном угле поворота цилиндра φ, соответственно. На каждом фиксированном угле φ плотность теплового потока измерялась в течение10 с. В исследованиях для пары цилиндров расстояние между ними *S* менялось в пределах от 0,5*d* до 4*d*. Максимальная интенсивность пульсаций для второго цилиндра была ниже, практически, на треть и зависела от режима течения. Распределения пульсаций для одиночного и второго цилиндра пары отличаются как по уровню, так и по форме. Для одиночного цилиндра интенсивность пульсаций растет при φ = 70…180°.



а) б)

Рис. 1. Интенсивность пульсаций плотности теплового потока для одиночного цилиндра (а) и для второго цилиндра в случае обтекания при $S = 2d$ (б).

В дальнейшем планируется получить распределения спектра мощности пульсаций плотности теплового потока по периметру для одиночного и второго цилиндра. Зависимость спектра мощности от частоты для плотности теплового потока позволит сравнить результаты с энергетическим спектром скорости и сопоставить течение и теплообмен при обтекании цилиндров на уровне пульсаций скорости и теплового потока.

Список литературы

1. **Гусаков А.А.** течение и теплообмен при обтекании цилиндра: совмещение PIV-метода и градиентной теплометрии. Автореф. дисс. канд. Наук, СПб, 2015 г.
2. **Sergey Z. Sapozhnikov, Vladimir Yu. Mityakov, Andrey V. Mityakov** // Heatmetry The Science and Practice of Heat Flux Measurement // Springer International Publishing, 2020.

V.Yu. Mityakov, V.V. Seroshtanov, A.S. Vlasov, V.V. Suchok, N.A. Zhidkov

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

STUDY OF HEAT FLUX FLUCTUATIONS INTENSITY DURING FLOW AROUND A CIRCULAR CYLINDER

УДК 621.9

Л.Е. Осипов[1], *Л.В. Плотников*[1], *О.А. Плотников*[1]

[1] ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, 620002, Мира 19

ВЛИЯНИЕ МАСШТАБА ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПОТОКА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛООТДАЧИ В КАНАЛАХ С РАЗНЫМИ ПОПЕРЕЧНЫМИ СЕЧЕНИЯМИ

Газодинамическая эффективность гидравлических систем энергетических машин и установок существенно зависит от начального уровня турбулентности потоков. В свою очередь, уровень турбулентности течения оказывает влияние на структуру пограничного слоя в каналах, а соответственно, и на интенсивность теплоотдачи [1-3]. Поэтому для того, чтобы рассчитывать и проектировать гидравлические системы энергомашин с перспективными характеристиками необходимы сведения о влиянии масштаба турбулентности потока на интенсивность теплоотдачи в трубопроводах, имеющих разные поперечные сечения. В данном исследовании на основе численного моделирования проводилась оценка начального масштаба турбулентности стационарных потоков газа в длинных гладких каналах разной конфигурации.

Исследования выполнялись для трех различных трубопроводов с эквивалентным диаметром 42 мм и длиной 1000 мм. В первом случае труба имела постоянное круглое сечение по всей длине – базовый вариант. Во втором и третьем вариантах трубы имели поперечные сечения в форме треугольника и квадрата по всей длине. В качестве граничных условий на входе потока задавались начальные параметры турбулентности и скорость потока газа w. Скорость потока изменялась в диапазоне от 10 до 100 м/с. Начальный масштаб турбулентности изменялся от 10 % до 30 %. Рабочей средой являлся реальный газ. Значения физических свойств потока газа были приняты равными свойствам реального газа при 40 °С. Стенки непроницаемы с постоянной температурой 120 °С. Число расчетных ячеек всей расчетной модели превысило 2 500 000. Число призматических слоев составило 30, абсолютный размер толщины призматического слоя равнялся 2,2 мм, показатель скорости роста с поверхности был 1,05, растяжение призматического слоя составляло 1,2.

На основе численного моделирования была проведена оценка масштаба турбулентности потока на интенсивность теплоотдачи в каналах с разными поперечными сечениями при разных скоростях (рис. 1).

Из рисунка видно, что при использовании трубопровода с участком треугольного поперечного сечения в диапазоне скоростей от 20 до 80 м/с наблюдается рост коэффициента теплоотдачи до 8% (по сравне-

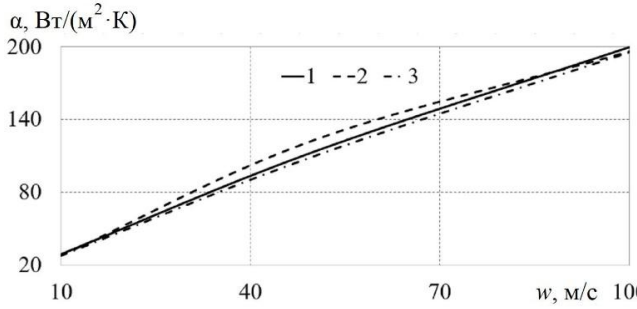


Рис. 1. Зависимости коэффициента теплоотдачи α от скорости потока воздуха *w* при начальном масштабе турбулентности 30 % в каналах с разными поперечными сечениями: *1* — круг; *2* — треугольник; *3* — квадрат.

нию с базовым вариантом). Что касается участка с квадратным сечением, то при любом значении показателя скорости, коэффициент теплоотдачи в среднем на 2-3% ниже, чем у базового варианта.

Работа выполнена при поддержке РНФ в рамках научного проекта 18-79-10003.

Список литературы

1. **Валуева Е.П., Кулик А.А.** Особенности процесса конвективного теплообмена при пульсирующем турбулентном течении газа в трубе // Теплоэнергетика. 2006. № 5. С. 50–55.
2. **Краев В.М., Янышев Д.С.** Проблемы расчета переходных процессов при турбулентном течении в каналах электроустановок ЛА // Труды МАИ. 2010. № 37. С. 3–15.
3. **Liao N.S., Wang C.C.** On the convective heat transfer in pulsating turbulent pipe flow / N. S. Liao, // 1st World Conf. – Exp. Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics. 1988. P. 536-542.

L.E. Osipov [1], L.V. Plotnikov[1], O.A. Plotnikov[1]

[1] Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Russia, 620002, Ekaterinburg, Mira 19

INFLUENCE OF THE SCALE OF FLOW TURBULENCE ON THE INTENSITY OF HEAT TRANSFER IN CHANNELS WITH DIFFERENT CROSS SECTIONS

УДК 533.601.1

Е.В. Панкратов, Ю.Л. Леухин

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СУЖЕНИЯ КОЛЬЦЕВОГО КАНАЛА И ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА НА ФОРМИРОВАНИЕ ВИХРЕЙ ТЕЙЛОРА – ГЁРТЛЕРА

В работе выполнено исследование влияния сужения кольцевого канала на формирование вторичных вихрей Тейлора-Гёртлера при закрутке потока и различных числах Рейнольдса. Сужение кольцевого канала 2 осуществлялось в первом случае (рис. 1а) за счет уменьшения диаметра внешней поверхности 3 от $d_2^{вх} = 184$ мм (при $z = 0$), а во втором (рис. 1б) – увеличения диаметра внутренней поверхности 1 от $d_1^{вх} = 152$ мм. В обоих случаях площадь поперечного сечения канала по последовательно уменьшалась к выходному сечению $f_к^{вых}$ (при $z = l$) от 100% до 20% с шагом в 20%. В выходном сечении в первом вариант диаметре $d_2^{вых}$ уменьшался от 184 до 158,9 мм, а во втором – $d_1^{вых}$ увеличивался от 152 мм до 178,1 мм. Длина кольцевого канала во всех случаях равнялась $l = 840$ мм. Геометрические размеры тангенциального генератора закрутки потока 4 приведены в [1].

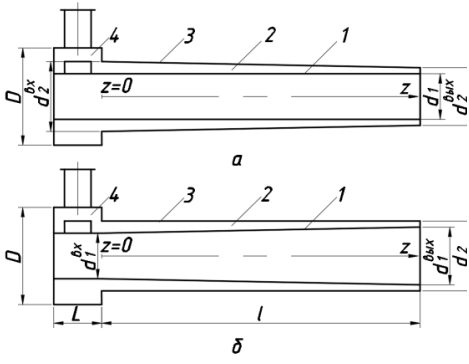


Рис. 1. Схематический чертеж исследованной геометрии; *а* – изменение внешней поверхности; *б* – изменение внутренней поверхности

Исследования выполнены при изменении числа Рейнольдса $Re_{вх}$ от $11{,}3 \cdot 10^3$ до $77{,}1 \cdot 10^3$ ($Re_{вх} = V_{вх} d_э / \nu$; $V_{вх}$ - средняя скорость потока во входном шлице, $d_э = d_2^{вх} - d_1^{вх}$ – эквивалентный диаметр входного сечения кольцевого канала, ν – кинематический коэффициент вязкости).

Численное моделирование осуществлялось в трехмерной постановке с использованием программного комплекса ANSYS Fluent 15.0.

При закрученном течении потока в кольцевых каналах формируются вторичные течения по типу вихрей Тейлора-Гёртлера [1]. На рис.2 приведено распределение радиальной составляющей скорости $\overline{w}_r$ и эффективной вязкости μ_{ef} в поперечном сечении кольцевого канала при

различных геометрических характеристиках и значениях числа Рейнольдса $Re_{вх}$.

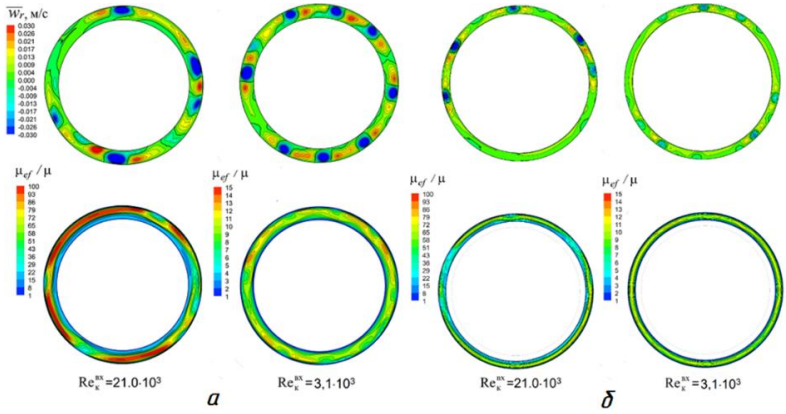


Рис. 2. Распределение изотах $\overline{w}_r$ и μ_{ef} в поперечном сечении кольцевого канала при z = 538 мм при различных значениях числа $Re_{вх}$;
а – $f_к^{вых}/f_к^{вх}$ = 1; *б* – $f_к^{вых}/f_к^{вх}$ = 0,4

При снижении числа $Re_{вх}$ количество вторичных вихрей увеличивается, их распределение в поперечном сечении канала становится более равномерным, а интенсивность падает. С уменьшением параметра $f_к^{вых}/f_к^{вх}$ по мере продвижения потока в направлении к выходному сечению интенсивность вторичных течений также снижается по длине за счет раскрутки потока и увеличения осевой составляющей скорости. Это приводит к снижению по длине кольцевого канала эффективной вязкости μ_{ef}, определяющей влияние турбулентности потока на интенсивность теплоотдачи рабочих поверхностей.

Список литературы

1. **Леухин, Ю.Л.** Исследование аэродинамики и теплоотдачи сужающихся кольцевых каналов с закрученным течением потока / Ю.Л. Леухин, Е.В. Панкратов, С.В. Карпов // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2018. – № 1 (82) – С. 34–39.

E.V. Pankratov, Yu.L. Leukhin

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

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF NARROWING ANNULAR CHANNEL AND REYNOLD'S NUMBER ON FORMATION OF TAYLER-GERTLER VORTEXES

УДК 621.9

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

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

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ КОНВЕКЦИИ В РАЗЛИЧНЫХ ЖИДКОСТЯХ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАСПОЛОЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА НАГРЕВА

Взаимодействие всплывающего потока жидкости со свободной поверхностью имеет большое значение для многих геофизических и технических приложений и во многом зависит от состояния поверхности. Одним из самых важных факторов взаимодействия оказывается наличие или отсутствие поверхностной пленки [1,2]. В воде пленка отсутствует только при высокой степени очистки (деионизации). Такая же пленка присутствует в глицерине, парафине и некоторых спиртах. Для второй группы жидкостей (силиконовое масло, этанол, изопропанол и др.) выполняются стандартные условия Пирсона на поверхности. При всплытии струи при отсутствии пленки существенную роль в растекании может играть термокапиллярный механизм конвекции.

При наличии заглубленного источника нагрева конвективная струя образуется за счет выталкивающей силы (рэлеевский механизм), а при ударе о поверхность происходит перераспределение давления по горизонтали, как и в гидродинамических струях [3]. Однако при приближении источника нагрева к поверхности разгона струи не происходит, но давление перераспределяется, и горизонтальный участок начинает играть основную роль в создании конвективного движения [2]. В зависимости от глубины расположения источника нагрева будет преобладать тот или иной механизм конвекции.

В работе исследовалось поле скоростей тремя методами – экспериментально, с помощью цифровой трассерной визуализации (PIV), численно, с помощью моделирования, а также с помощью нахождения автомодельных решений для погранслоя вблизи поверхности. Нагрев создавался линейным источником тепла – проволочкой из сплава копель длиной 11,3 см и диаметром 0,02 см, натянутой под поверхностью жидкости в прямоугольном стеклянном аквариуме размерами 12,3 см×13,2 см×6,5 см. На рис. 1 представлен сравнительный анализ поля горизонтальных скоростей для численного расчета и эксперимента. Как видно из графиков, моделирование и эксперимент дают сходные результаты, но граничные условия в расчетах совершенно различ-

ны. Термокапиллярный механизм намного эффективнее с точки зрения условий растекания струи.

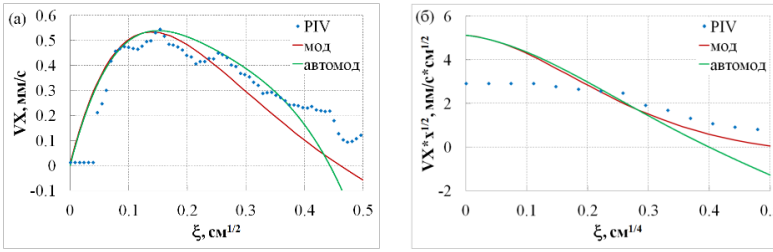


Рис. 1. Сравнительный анализ автомодельного решения, численного решения и экспериментальных измерений методом PIV. а) Вода, h = 0, Q = 14,7 Вт/м; б) этанол, h = 0, Q = 4,1 Вт/м.

Таким образом, в работе было показано, что взаимодействие конвективных и гидродинамических струй с поверхностью жидкости существенно отличается. Архимедова сила приводит к перераспределению давления у поверхности, и этот фактор либо добавляется к стандартному переходу кинетической энергии струи в потенциальную при отражении, либо остается единственным механизмом разгона струи при приближении источника нагрева к поверхности. Второй важной особенностью является отсутствие или наличие поверхностной пленки в жидкости. Наличие пленки блокирует термокапиллярный механизм.

Список литературы

1. **Vinnichenko N. A., Uvarov A. V., Plaksina Y. Y.** 2014. Combined study of heat exchange near the liquid–gas interface by means of background oriented schlieren and infrared thermal imaging // Exp. Therm. Fluid Sci. 59: 238–245.
2. **Vinnichenko N.A., Pushtaev A.V., Plaksina Yu.Yu, Rudenko Yu.K., and Uvarov A.V.** Horizontal convection driven by nonuniform radiative heating in liquids with different surface behavior. //International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, V. 126, pp.400–410.
3. **Glauert M. B.** 1956.The wall jet // J. Fluid Mech. 1:625-643.

Y.K. Rudenko[1], *Y.Y. Plaksina*[1], *N.A. Vinnichenko*[1], *A.V. Pushtaev*[1], *A.V. Uvarov*[1]

[1] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics,
Russia 11999q Moscow, Leninskiye Gory, 1/2

COMPARATIVE ANALYSIS OF CONVECTION MECHANISMS IN DIFFERENT LIQUIDS DEPENDING ON THE LOCATION OF THE HEATING SOURCE

УДК 536.2+532.556

Р.Р. Шакиров[*], *И.А. Давлетшин, Н.И. Михеев*

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: radiffshakirov@mail.ru

ГИДРОДИНАМИКА И КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ С ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМ ГРАДИЕНТОМ ДАВЛЕНИЯ

Течения с наличием положительного градиента давления широко встречаются в элементах конструкций энергетических устройств, особенно в диффузорах. Повышение их эффективной работы, подразумевает снижение гидравлического сопротивления в каналах и увеличения теплосъема с поверхностей. Для этого большое внимание уделяется изучению фундаментальных свойств турбулентных течений и процессов переноса массы, импульса и энергии в пограничном слое [1].

Представлены результаты экспериментального исследования распределения теплообмена на стенке в диффузоре с углом раскрытия φ=2,5 º. Рабочий участок представлял собой канал длиной L=1800 мм и шириной 150 мм, высота канала во входном сечении составила H_0=28 мм. К каналу присоединялось входное устройство (рис 1). В ходе тепловых экспериментов были получены распределения коэффициента теплоотдачи для разных расходов воздуха Q. Полученные результаты представлены в форме зависимости чисел Стэнтона $St=\alpha/(\rho c_p U_0)$ от числа Рейнольдса $Re=U_0 x/\nu$, определенных по скорости потока на входе в диффузор U_0, и продольной координаты x (рис 2а). Начало обогреваемого участка совпадало с входным сечением диффузора.

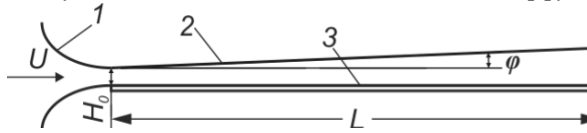


Рис. 1. Схема экспериментального участка: *1 — входное устройство*; *2 — диффузор;3 — нагреваемая стенка*.

При помощи метода SIV [2] получены профили векторных полей скоростей и параметров турбулентности в различных сечениях вдоль канала. Режимы течения и конфигурация канала аналогичны теплообменным экспериментам. Проведено сопоставление распределения теплообмена и структуры потока в пограничном слое в наиболее характерных сечениях в ламинарной, турбулентной и переходной области. Показано влияние продольного положительного градиента давления на

профили Рейнольдсовых напряжений. Отмечена высокая чувствительность энергии турбулентности в пограничном слое на наличие продольного градиента давления (рис 2б).

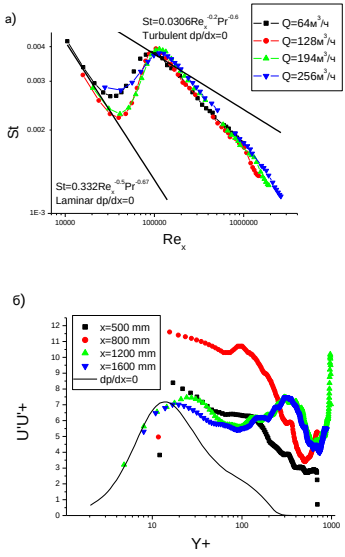


Рис. 2. Результаты экспериментов: *а) — распределение числа St*;
б) — профили корреляций продольных скоростей по различным сечениям.

Список литературы

1. **Дейч М. Е., Зарянкин А. Е.** Газодинамика диффузоров и выхлопных патрубков турбомашин, М., «Энергия», 1970.384 с. с илл.
2. **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). https://doi.org/10.1134/S0020441216060063

Измерения теплообмена выполнены за счет РФФИ №19-08-0042, исследование структуры потока за счет РНФ 19-19-00355

R.R. Shakirov, I.A. Davletshin, N.I. Mikheev

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

HYDRODYNAMICS AND CONVECTIVE HEAT TRANSFER IN ADVERSE PRESSURE GRADIENT BOUNDARY LAYER

УДК 532.517

М.А. Засимова, Н.Г. Иванов

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

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРОЦЕДУРЫ КОРРЕКЦИИ МОДУЛЯ СКОРОСТИ ДЛЯ ЗАДАЧ ВЕНТИЛЯЦИИ

При решении задач, связанных с вентиляцией и кондиционированием помещений, особую роль играет оценка характерных значений скорости в обитаемой области – рабочей зоне. Расчет воздухообмена в помещении на практике часто выполняется с помощью трехмерного численного моделирования с привлечением подхода RANS, т.е. на основе решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса. Используя RANS подход, можно получить информацию об осредненных во времени значениях компонент скорости и о соответствующем поле модуля осредненной скорости, $V_m = (<V_x>^2+<V_y>^2+<V_z>^2)^{0.5}$. Однако для оценки степени комфорта необходимо иметь информацию об осредненном поле модуля скорости, $V_a = <(V_x^2+V_y^2+V_z^2)^{0.5}>$, которое может существенно отличаться от поля V_m [1].

В общем случае, связь полей V_a и V_m неизвестна. В литературе имеются полуэмпирические методики коррекции данных RANS [1-2], которые позволяют оценить поле скорости V_a с помощью рассчитанных по RANS полей V_m и кинетической энергии турбулентности, k. В частности, в СПбПУ была предложена формула $V_a^{Corr} = (V_m^2 + 5/3k)^{0.5}$ [2]. С помощью метода моделирования крупных вихрей (LES подход) можно получить актуальные и осредненные значения V_a и V_m, а также рассчитать k. Цель настоящей работы – оценка известных из литературы методик коррекции модуля скорости на основе решения тестовых вентиляционных задач, для которых имеются достоверные данные экспериментов [3-4], и выработка рекомендаций по использованию методик коррекции данных на основе результатов численного моделирования.

Проведены расчеты воздухообмена в двух модельных помещениях, размеры которых равны: 9м×3м×3м [3] и 6м×3м×6м [4], среднерасходные скорости на входе составляют 0.455 м/с [3] и 5.16 м/с [4], соответствующие значения чисел Рейнольдса, построенных по входным параметрам, равны 5.2×10^3 и 4.6×10^4. Расчеты выполнены с использованием как вихреразрешающего подхода LES, так и подхода RANS с замыканием различными полуэмпирическими моделями турбулентности. Использовались квазиструктурированные сетки общей размерностью до 58 млн ячеек. Расчеты проводились в пакете ANSYS Fluent на ресурсах СКЦ «Политехнический».

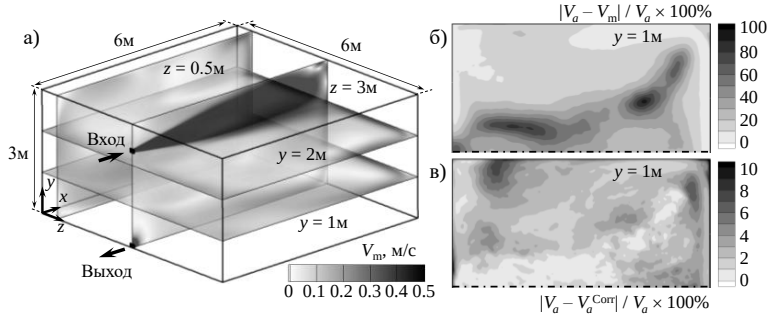


Рис. 1. а) Поля модуля средней скорости, V_m; различие между полями скорости б) V_a и V_m, и в) V_a и V_a^{Corr} в сечении y = 1м (данные LES)

Картина течения в помещении из [4] показана на рис. 1а: можно выделить область струйного течения с высокими значениями скорости (при y > 2м) и область вторичного течения (рабочая зона) в которой могут находиться люди (при y < 2м). По данным LES расчетов показано, что в рабочей зоне отличия между полями скорости V_a и V_m локально могут достигать 80%, для сечения y = 1 м в среднем эти отличия составляют 25% (рис. 1б). Применение процедуры коррекции поля модуля скорости [2] к LES данным позволяет получить скорректированное поле скорости, V_a^{Corr}, отличающееся от искомого поля V_a менее чем на 10%; в сечении y = 1 м отличия между V_a и V_a^{Corr} минимальны и в среднем составляют 2%.

Список литературы

1. **Koskela H., Heikkinen J., Niemela R., Hautalampi T.** Turbulence correction for thermal comfort calculation. Building and Environment, V. 36(2), P. 247-55. 2001
2. **Smirnov E.M., Ivanov N.G., Telnov D.S., Son C.H., Aksamentov V.K.** Computational Fluid Dynamics Study of Air Flow Characteristics in the Columbus Module. SAE Technical Paper 2004-01-2500, pp. 1-8, 2004.
3. **Nielsen P.V., Restivo A., Whitelaw J.H.** The velocity characteristics of ventilated room. ASME J. Fluids Engineering, vol. 100, pp. 291-298, 1978.
4. **Hurnik M., Blaszczok M., Popiolek Z.** Air distribution measurement in a room with a sidewall jet: a 3D benchmark test for CFD validation. Building and Environment. V. 93, part 2. P. 319-330, 2015.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 20-58-18013).

M.A. Zasimova, N.G. Ivanov

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

ON THE USE OF MEAN VELOCITY CORRECTION PROCEDURES FOR VENTILATION PROBLEMS

УДК 533.6.011.6

В.Н. Ковальногов[1], *Ю.А. Хахалев*[1], *Л.В. Хахалева*[1], *Р.В. Федоров*[1], *Е.В. Цветова*[1]

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

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕНОСА НА ОСНОВЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ХЕРСТА

В стратегической программе развития энергетики России до 2030 года представлены задачи государственной политики в области энергоэффективности и энергосбережения. Одной из задач является развитие научно-технического потенциала, включая фундаментальную науку, прикладные исследования и разработки. Применение новых материалов и структурирование поверхностей приводит к тонким эффектам, позволяющим добиться снижения сопротивления трения и теплоотдачи, что в свою очередь служит повышению эффективности работы энергооборудования. В соответствии с проведенными исследованиями была предложена зависимость коэффициента интенсивности турбулентного обмена количества движения на основе показателя Херста [1].

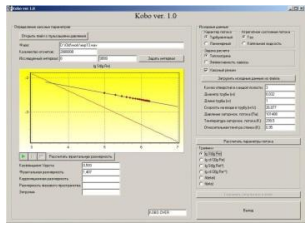
Численное исследование модели турбулентного переноса на основе показателя Херста. В результате проведенного численного исследования теплоотдачи турбулентного потока была получена зависимость на основе показателя Херста [2]:

$$\frac{\mathrm{St}}{\mathrm{St}_0} = 0{,}5 \cdot \left(1 - \frac{a}{Re^{0{,}75}}\right) \mathrm{th}(c \cdot H + d) + 0{,}5 \cdot \left(1 + \frac{b}{Re^{0{,}75}}\right), \qquad (1)$$

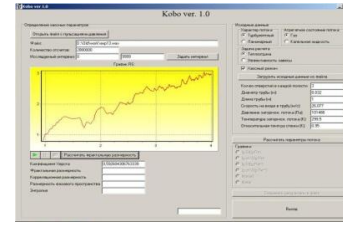
где a, *b*, *c*, *d* – эмпирические коэффициенты; H – показатель Херста, вычисленный для пульсаций давления турбулентного потока на структурированной и гладкой поверхности; St, St_0 – числа Стантона на стабилизированных участках структурированной и гладкой поверхности соответственно; Re – число Рейнольдса.

Предложенная модель турбулентного переноса теплоты и количества движения на основе показателя Херста пульсаций давления потока, реализована в компьютерной программе, функционально состоящей из следующих частей: препроцессор, процессор и постпроцессор. Препроцессор включает: выбор режима расчета, загрузку исходных данных, в том числе пульсаций давления в виде файла с расширением .wav. Процессор осуществляет численный расчет характеристик турбулентного потока таких как: сопротивление трения, теплоотдача, профили скорости и температуры. Кроме этого, процессор содержит мо-

дуль, отвечающий за расчет показателя Херста пульсаций давления. Постпроцессор отвечает за вывод результатов расчета. Результаты расчета отображаются в графическом виде, а также записываются в виде файла на жестком диске. Графическая информация представляется в графическом окне. Переход к просмотру очередного графика осуществляется переключателем типа «radio button».



(а)



(б)

Рис.1. Интерфейс программы после расчета (а) показателя Херста; (б) - теплоотдачи.

Проведено численное исследование теплоотдачи турбулентного потока с использованием математической модели турбулентности на основе показателя Херста.

Исследования выполнены при поддержке грантом Президента Российской Федерации по проекту НШ- 2493.2020.8.

Список литературы

1. **Vladislav N. Kovalnogov, Ruslan V. Fedorov, Dmitry A. Generalov, Yury A. Khakhalev, and Aleksandr N. Zolotov** Numerical research of turbulent boundary layer based on the fractal dimension of pressure fluctuations / AIP Conference Proceedings 1738, 480004 (2016); doi: 10.1063/1.4952240.
2. **Vladislav N. Kovalnogov, Ruslan V. Fedorov, Urii A. Khakhalev, Larisa V. Khakhaleva, Andrei V. Chukalin** Application Of The Results Of Experimental & Numerical Turbulent Flow Researches Based On Pressure Pulsations Analysis / AIP Conference Proceedings 1863, 560018 (2017).

V.N. Kovalnogov[1], *J.A. Khakhalev*[1], *L.V. Khakhaleva*[1], *R.V. Fedorov*[1], *E.V. Tsvetova*[1]

[1]Ulyanovsk State Technical University,
32 Severny Venets, Ulyanovsk, 432027, Russia

DEVELOPMENT AND STUDY OF TURBULENT TRANSPORT MODELS BASED ON THE HURST EXPONENT

УДК 532.5, 534.6

О.В. Митрофанова[1,2], *И.Г. Поздеева*[1,2], *Н.А. Старовойтов*[1]

[1] Национальный исследовательский центр «Курчатовский Институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1,
[2] Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409, Москва, Каширское ш., 31

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ВОЗБУЖДЕНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ ЭФФЕКТОВ В СЛОЖНОЙ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Работа посвящена выявлению условий возбуждения резонансных колебаний в контурах циркуляции рабочих сред энергетических установок. Исследование механизма возбуждения резонансных эффектов в сложной гидромеханической системе проводилось на примере импактного закрученного течения. Рассматривалась модель распространения акустических колебаний в канале в приближении полупрозрачности акустических неоднородностей, в качестве которых могут выступать изгибы, ветвления, мембраны, изменения проходного сечения и иные локальные элементы конструкции, вносящие существенное гидравлическое сопротивление [1].

Исследования проводились на газодинамическом стенде. В качестве рабочего участка использовалась вихревая камера с тангенциальным подводом сжатого воздуха. Закрученный воздушный поток покидал объем вихревой камеры через небольшое отверстие в верхней крышке камеры и ударял по преграде, выполненной в форме плоского диска. По характеру регистрируемых в процессе экспериментов акустических колебаний было выделено два режимах истечения импактонй закрученной струи: звуковой дорезонансный и резонансный. Было установлено, что основным источником возбуждения пульсаций давления в потоке являлась система крупномасштабных вихреобразований, генерируемых на выходе из вихревой камеры.

Тип колебаний, соответствующий звуковому дорезонансному режиму, относится к вынужденным колебаниям при наличии затухания. В рассматриваемом случае в качестве вынуждающей силы выступает сила, связанная с колебаниями звукового давления. Было установлено, что устойчивая спирально-вихревая структура потока формируется при возбуждении собственных колебаний крышки вихревой камеры. Описываемый процесс соответствует условию акустического резонанса, сопровождаемого резким усилением акустических колебаний на частоте, совпадающей с собственной частотой колебательной системы.

В результате обработки амплитудно-частотных характеристик звуковых колебаний была рассчитана мощность акустической энергии для набора преград диаметром 30-90 мм (с шагом 10 мм) и определены

коэффициенты затухания δ. Резонансный режим истечения импактной закрученной струи наблюдался на преградах диаметром 50, 60 и 70 мм при частоте f_0 = 2800 Гц, что соответствовало частоте собственных колебаний плексигласовой крышки вихревой камеры. На преградах диаметром 30 и 40 мм, а также 80 и 90 мм резонансный режим не наблюдался. Построение резонансных кривых (рис.1) для набора преград с рассчитанными в результате обработки экспериментальных данных коэффициентами затухания показало, что резонансный режим уверенно фиксировался при увеличении амплитуды колебаний минимум в 2 раза по сравнению с дорезонансным режимом, т.е. при коэффициенте затухания $\delta < 0{,}25\ f_{рез.}$

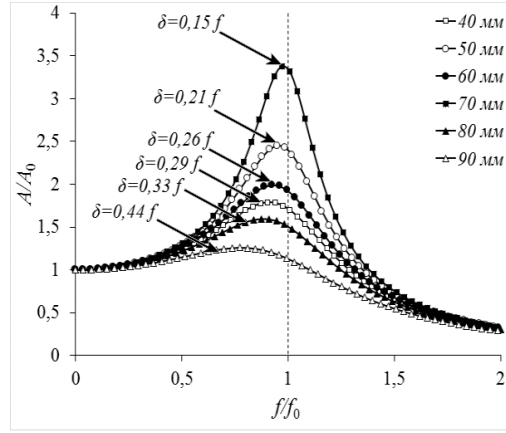


Рис. 1. Резонансные кривые для преград различного диаметр при расходе $G = 1{,}3 \cdot 10^{-3}$ м^3/с и диаметре выходного отверстия d_0 = 5 мм.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований, грант № 19-08-00223 и Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ (Договор No. 02.a03.21.0005).

Список литературы

1. **Аркадов Г.В., Павленко В.И., Слепов М.Т.** «Виброакустика в приложениях к реакторной установке ВВЭР-1200» – М.: Наука, 2018. – 469 с.

O.V. Mitrofanova[1,2], *I.G. Pozdeeva*[1,2], *N.A. Starovoytov*[2]

[1] National Research Center "Kurchatov Institute",
Russia, 123182 Moscow, Akademika Kurchatova pl., 1
[2] National Nuclear Research University "MEPHI",
Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe hwy,31

INVESTIGATION OF THE EXCITATION MECHANISM OF RESONANT EFFECTS IN A COMPLICATABLE HYDRO-MECHANICAL SYSTEM

УДК 533.601.1

Е.В. Панкратов, Е.А. Тетерин, Ю.Л. Леухин

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИХРЕЙ ТЕЙЛОРА-ГЁРТЛЕРА НА ТЕПЛООТДАЧУ КОЛЬЦЕВОГО КАНАЛА

В работе выполнен анализ влияния вторичных течений типа вихрей Тейлора-Гёртлера на аэродинамику и теплоотдачу кольцевого канала.

Кольцевой канал 2 (рис. 1 а) образован внутренней поверхностью 1 с диаметром d_1 = 152 мм и внешней 3 с диаметром d_2 = 184 мм. Длина канала l равна 840 мм. Генератор закрутки 4 имеет внутренний диаметр D = 259 мм и длину L = 126,5 мм, воздух подается тангенциально внутренней поверхности через плоский канал 3, внутренние размеры которого 35×70 мм (больший размер вдоль образующей цилиндра).

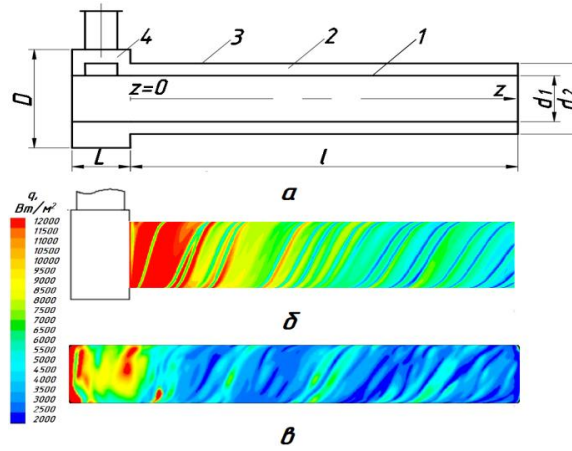


Рис. 1. Схематический чертеж кольцевого канала (а), распределения плотностей теплового потока на внешней (б) и внутренней (в) его поверхностях.

Численное моделирование осуществлялось в трехмерной постановке с использованием программного комплекса ANSYS Fluent 15.0 с моделью турбулентности Shear Stress Transport k-ω и поправкой на кривизну линий тока. Верификация результатов численного моделирования аэродинамики и теплоотдачи осуществлялась на опытных данных, полученных на физической модели прямого кольцевого канала с аналогичными геометрическими размерами. Плотность теплового потока на обеих поверхностях канала в физическом эксперименте опре-

делялась с помощью паровых калориметров, а ее неравномерность в продольном и азимутальном направлениях контролировалась градиентными датчиками теплового потока.

Установлено, что при истечении закрученного потока из генератора закрутки в кольцевой канал от передней кромки наружного цилиндра 3 кольцевого канала образуются крупномасштабные нестационарные поперечные вихри в виде периодического процесса, характеризующегося числами Струхаля в среднем равными 0,22 [1]. Искривление осей вихрей и ориентация их по потоку приводит к формированию структур типа нестационарных вихрей Тейлора – Гёртлера, постепенно занимающих все пространство кольцевого зазора. Поскольку предельные углы закрутки потока на внешней и внутренней поверхностях различаются, происходит растягивание вихрей в азимутальном направлении, а затем деление крупных на более мелкие.

Возникновение и трансформация вихревых структур оказывает значительное влияние на распределение теплового потока по рабочим поверхностям (рис.1 б, в). Спиралевидные линий распределений по длине плотностей тепловых потоков практически совпадают с предельными углами закрутки потока на них. Наблюдаются явная связь между флуктуациями полной скорости, эффективной вязкостью около стенок кольцевого канала с плотностями тепловых потоков на них.

Следует отметить, что наиболее высокая интенсивность теплоотдачи на внешней поверхности наблюдается в областях положительных значений радиальной скорости, а на внутренней – отрицательных.

Из-за раскрутки потока происходит значительное снижение среднего коэффициента теплоотдачи по длине внешней поверхности. На внутренней стенке падение теплоотдачи менее интенсивное. Это объясняется тем, что перенос вторичными вихрями более турбулизированного потока от внешней поверхности к внутренней снижает консервативное влияние центробежных сил на теплоотдачу.

Список литературы

1. **Леухин, Ю.Л.** Исследование аэродинамики и теплоотдачи сужающихся кольцевых каналов с закрученным течением потока / Ю.Л. Леухин, Е.В. Панкратов, С.В. Карпов // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2018. – № 1 (82) – С. 34–39.

E.V. Pankratov, E.A. Teterin, Yu.L. Leukhin

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

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF TAYLOR-GÖRTLER VORTEXES ON HEAT TRANSFER OF ANNULAR CHANNEL

УДК 532.5.01

М.А. Клюев[1,2], *В.М. Молочников*[1,2]

[1] Казанский научный центр РАН, 420111, Казань, ул. Лобачевского, 2/31
[2] Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ, 420111, Казань, ул. К. Маркса, 10

СТРУКТУРА ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА ЗА ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ ПРЕПЯТСТВИЕМ В ОГРАНИЧЕННОМ БОКОВЫМИ СТЕНКАМИ КАНАЛЕ

Несмотря на значительное количество экспериментальных и численных исследований отрыва потока за поперечными препятствиями, влияние ограниченности потока по размаху препятствия на структуру течения за ним изучено слабо. Принято, что при $l > (10\ldots12)h$ в центре препятствия имеется достаточно протяженная область двумерного (в среднем) течения [1]. Здесь h – высота препятствия; l – его размах. В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований течения за цилиндрическим выступом, расположенным без зазора на нижней стенке канала прямоугольного поперечного сечения высотой H =115 мм и шириной B = 150 мм. Диаметр цилиндра составлял 15 мм. При помощи метода SIV [1] выполнены измерения мгновенных векторных полей скорости потока за препятствием в двух вертикальных плоскостях (плоскости симметрии и плоскости, расположенной на расстоянии 15 мм от боковой стенки канала) и двух горизонтальных плоскостях на расстоянии 5 и 15 мм от нижней стенки канала. Все измерения проводились при числе Рейнольдса Re = 3900, рассчитанном по диаметру цилиндра.

Установлено, что в непосредственной близости от препятствия (x/d = 0,58) продольная компонента скорости слабо изменяется по размаху препятствия. С удалением от препятствия область двумерного в среднем течения в центре канала сокращается и при $x/d > 2$ она полностью исчезает. Выявлено отличие профилей скорости в различных сечениях по размаху препятствия при одинаковом расстоянии от него. Кроме того, оторвавшийся сдвиговой слой искривляется и в вертикальной плоскости, о чем свидетельствует различное удаление максимумов пульсаций продольной компоненты скорости потока от нижней стенки канала по его ширине (рис.2). Выявлены и другие закономерности трехмерного распределения статистических характеристик течения в следе препятствия при исследуемом значении числа Рейнольдса.

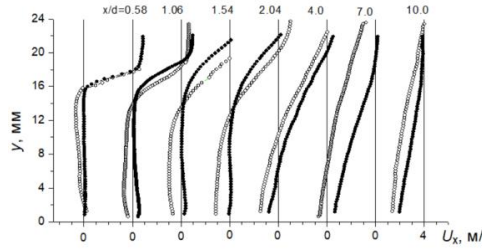


Рис. 1 Профили продольной компоненты скорости потока за препятствием

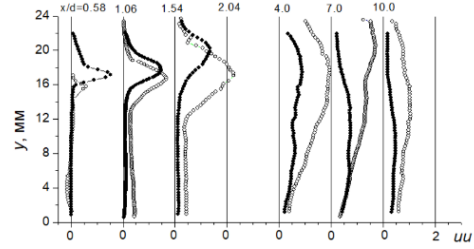


Рис. 2 Профили пульсаций продольной компоненты скорости за препятствием

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 20-61-47068 (подготовка экспериментального оборудования) и гранта РФФИ № 20-08-00621 (проведение SIV измерений).

Список литературы

1. **Mikheev N.I., Dushin N.S., Saushin I.I.** Capabilities of optical SIV technique in measurements of flow velocity vector field dynamics. Journal of Physics: Conference Series, 2017, Volume 891, conference 1. Article 012094

2. **H. Strandenes, B. Pettersen, H. I. Andersson and M. Manhart** Influence of spanwise no-slip boundary conditions on the flow around a cylinder // Computers & Fluids. 2017. T. 156. C. 48-57.

M.A. Klyuev[1,2], V.M. Molochnikov[1,2]

[1] FRC KazSC of RAS, 420111, Kazan, Lobachevsky st., 2/31
[2] Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev - KAI, 420111, Kazan, K. Marx st., 10

TURBULENT FLOW STRUCTURE BEHIND A CYLINDRICAL OBSTACLE IN A CHANNEL BOUNDED BY SIDE WALLS

УДК 532.5, 536.7

А.Ш. Байрамуков[1], *О.В. Митрофанова*[1,2]

[1] Национальный исследовательский центр «Курчатовский Институт»,
123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1
[2] Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
115409, Москва, Каширское ш., 31

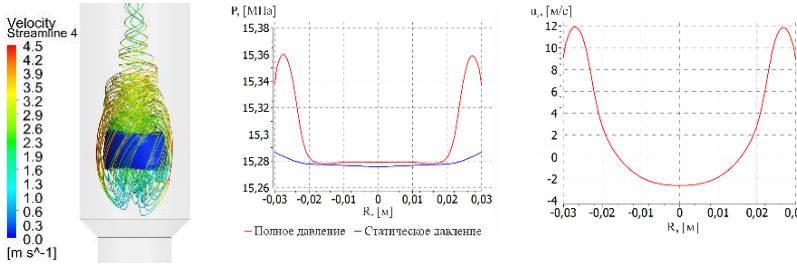
ИССЛЕДОВАНИЕ ВИХРЕВОЙ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ РАБОЧИХ СРЕД В ЭЛЕМЕНТАХ ТРУБОПРОВОДОВ СУДОВЫХ ЯЭУ

Актуальность исследования гидродинамических особенностей течения теплоносителя и рабочих сред в элементах теплогидравлического тракта судовых ЯЭУ обусловлена необходимостью повышения технико-экономических показателей работы атомных ледоколов нового поколения.

Опыт эксплуатации и анализ конструкций основного и вспомогательного оборудования судовых ЯЭУ позволил выделить в них типовые элементы, геометрия которых в динамических режимах способствует генерации устойчивых крупномасштабных вихреобразований. В перечень объектов настоящего исследования вошли: элементы трубопроводов с двумя и пятью изгибами в различных плоскостях, участки трубопроводов системы компенсации давления и парогенерирующих систем, сочетающие в себе переменность проходного сечения с изгибами каналов, змеевиковые каналы и участки трубопроводов с разветвлением. Для выбранных элементов типовой геометрии каналов проведены вычислительные эксперименты с целью выявления влияния сложной гидродинамики потоков на теплогидравлическую эффективность и ресурсную надежность судовых ЯЭУ.

В результате проведенных расчетно-теоретических исследований было выявлено, что наличие трехмерной кривизны трубопроводов, в частности, наличие двух и более изгибов во взаимно перпендикулярных плоскостях может приводить к формированию закрученного течения в масштабе всего поперечного сечения канала.

Эффект непреднамеренного возникновения закрутки потока в контурах циркуляции теплоносителя и рабочего тела может иметь негативные последствия в динамических режимах работы при быстром изменении мощности реактора в широком диапазоне. В этом случае могут реализоваться условия, когда расходная скорость в канале приближается к критической скорости закрученного течения, соответствующей скорости распространения длинных центробежных волн, что приводит к чрезмерному возрастанию гидравлического сопротивления вплоть до запирания потока.



а) б) в)

Рис. 1. а) Вихревая структура потока после прохождения узкого сегмента; б) профиль давления в центральном сечении вихревой структуры; в) профиль продольной компоненты скорости в центральном сечении вихревой структуры

Теория данного явления, получившая название кризиса закрученного потока, изложена в монографии академика РАН И.И. Новикова [1]. Математическое описание явления кризиса закрученного течения, сопровождающегося возникновением зоны рециркуляционного (возвратного) течения в замкнутых контурах циркуляции, получено при обосновании модели трансформации вихря в работе [2].

В качестве примера на рис. 1 представлены результаты вычислительного эксперимента, полученные для случая реализации кризисного режима закрученного течения в одном из элементов трубопровода системы компенсации давления с переменной площадью проходного сечения канала. Рис.1а демонстрирует трехмерную структуру зоны рециркуляционного течения с нулевым напором давления (рис.1б) и отрицательной скоростью течения (рис. 1в).

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований, грант № 19-08-00223 и Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ (Договор No. 02.a03.21.0005).

Список литературы

1. **Новиков И.И.** Термодинамика. М.: Машиностроение. – 1984.- С. 316-366.
2. **Митрофанова О.В.** Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерных энергетических установок. Изд.2-е. М.: ЛЕНАНД, 2019. 352 с.

A.S. Bayramukov [1], O.V. Mitrofanova[1,2]

[1] National Research Center "Kurchatov Institute",
Russia, 123182 Moscow, Akademika Kurchatova pl., 1
[2] National Nuclear Research University "MEPHI",
Russia, 115409 Moscow, Kashirskoe hwy,31

INVESTIGATION OF THE FLUID FLOW VORTEX STRUCTURES IN THE PIPELINE ELEMENTS OF THE MARINE NUCLEAR POWER INSTALLATIONS

УДК 621.039.6.536.24

Н.А. Лучинкин[1], Н.Г. Разуванов[2], Л.В. Ямщикова[2]

[1] Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Москва, 111111, Красноказарменная, 14
[2] Объединенный институт высоких температур РАН, 111116, Москва, Красноказарменная, 17А (•)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТЕЧЕНИИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В КОНТУРЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ

Пассивные системы охлаждения (ПСО), приводимые в действие природными силами, привлекли интерес исследователей после аварии на АЭС "Фукусима". Многие ПСО были разработаны в качестве конечного теплоотвода на атомных электростанциях. Часто используемая конструкция теплообменников ПК включает вертикальную геометрию трубы с естественным конвективным потоком теплоносителя внутри. Внутренний и внешний тепловые режимы вертикальной трубы оказывают значительное влияние на охлаждающую способность системы. Естественная конвективная теплопередача внутри вертикальной трубы изменяется в зависимости от длины и диаметра трубы, а также свойств материала рабочей жидкости. Эти переменные влияют на развитие импульсных и тепловых пограничных слоев.

Для трубы большого диаметра пограничные слои, которые развиваются из противоположных стенок трубы, не взаимодействуют. Таким образом, явления теплопередачи аналогичны тем, которые наблюдаются на вертикальных плоских пластинах. Для трубы малого диаметра пограничные слои взаимодействуют, сливаются и полностью развиваются внутри трубы, и таким образом на теплопередачу влияет диаметр канала. Слившийся горячий шлейф может ускоряться вдоль вертикальной трубы, делая ее похожей на дымоход. Из-за условий потока в канале объемный массовый расход на каждой высоте должен быть одинаковым.

Необходимо рассмотреть сложные явления в вертикальных трубах. Большинство исследований, касающихся теплопередачи внутри вертикальных труб, были сосредоточены на условиях принудительной конвекции. Исследования, касающиеся естественного конвективного теплообмена в вертикальных трубах, редки. Большинство исследований касалось одного или двух аспектов этих явлений.

В ОИВТ РАН на ртутном стенде РК-2 смонтирована петля естественной циркуляции, где проводятся исследования теплообмена при течении модельного жидкого металла (ртути) в вертикальном канале.

(•) Н.А. Лучинкин, LuchinkinNA@yandex.ru

Петля включает в себя вертикальные участки труб: опускное течение с холодильником и подъемная с нагревателем.

Исследования проводились на трубе с нагревателем зондовыми методами с использованием микро-термопарных датчиков. С помощью корреляционного двух-термопарного датчика в сечении канала получены профили осредненной скорости и температуры, интенсивность температурных пульсаций, распределение температуры стенки и коэффициентов теплоотдачи (рис.1). В экспериментах варьировались плотность мощность обогрева и гидравлическое сопротивление петли. Результаты по теплообмену обобщаются графиками числа Нуссельта от чисел Пекле, Грасгофа и Ричардсона.

Теплообмен в режиме естественной циркуляции фактически соответствует режиму смешанной турбулентной конвекции в вертикальной трубе при подъеме течения при малых расходах теплоносителя (числах Рейнольдса и Пекле).

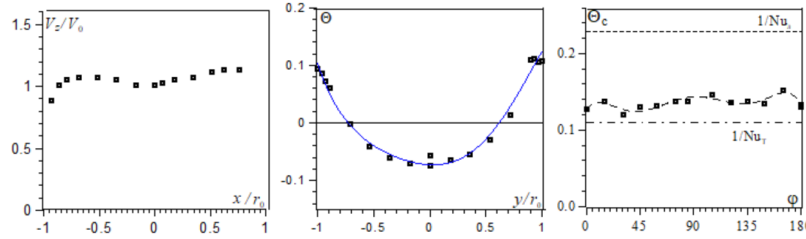


Рис.1. Профиль осредненной скорости (а) и температуры (б), распределение Безразмерной температуры стенки (в) в режиме естественной циркуляции q_c=20 кВт/м^2.

Список литературы

1. **Kumar E. et. al.** Preliminary design of Indian Test Blanket Module for ITER. – Fusion Engineering and Design. – 2008. – N83. – C. 1169-1172.

N.A. Luchinkin[1], N.G. Razuvanov[2], L.V. Yamshchikova[2]

[1] National Research University “Moscow Power Engineering Institute” Russia 111111 Moscow, Krasnokazarmennaya, 14

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

EXPERIMENTAL STUDY OF HEAT TRANSFER DURING THE LIQUID METAL FLOW IN THE NATURAL CIRCULATION LOOP

УДК 533.6.08

М.В. Филиппов, И.Н. Баранов.

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОМАССООБМЕНА КОЛЬЦЕВЫХ ИМПАКТНЫХ СТРУЙ

Работа представляет собой экспериментальное исследование турбулентного массопереноса и теплообмена в системе кольцевых импактных струй для организации эффективного охлаждения поверхностей. Системы охлаждения, включающие в себя охлаждение кольцевыми струями, являются довольно простыми в использовании. Такие системы достаточно подробно изучены [1-5], но единой фундаментальной теории до сегодняшнего дня не создано.

Экспериментальный стенд, предназначенный для исследования дозвуковых течений, включал в себя бесконтактный измеритель скорости (точечный 2-компонентый LDA). Также использовался тепловизор для тепловых измерений скорости с разрешением 600x800.

Проведено экспериментальное исследование импактной кольцевой струи при Re=5500 и Re=11000. При этом варьировалось расстояние от сопла до стенки. На рис. 1 представлен характерный тепловизионный снимок поверхности охлаждаемой кольцевой импактной струей. Основное внимание было уделено конфигурациям, с небольшими расстояниями от сопла до стенки. Это обусловлено массой практических приложений таких систем в элементах тепловой защиты.

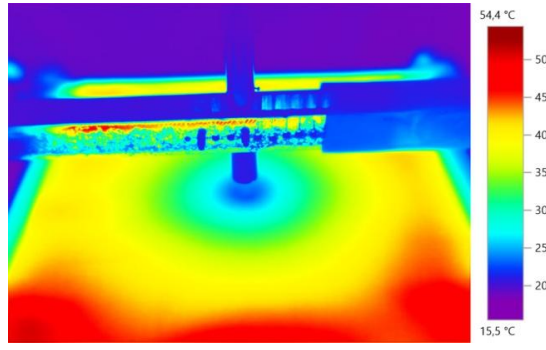


Рис. 1. Распределение температуры на поверхности при натекании импактной кольцевой струи. Re=5500.

При изучении аэродинамики кольцевой импактной струи было обнаружено, как и у автора работы [5], что существуют различные виды

течения, связанные с образованием тороидального вихря на выходе кольцевой струи. Первый вид – это прилипание тороидального вихря к охлаждаемой поверхности (при малых расстояниях от сопла до поверхности) (рис.2). Второй вид, это смыкание кольцевой струи перед ударом о поверхность (при больших от сопла). В переходном режиме образуется сложная картина течения, возникает пульсирование кольцевой струи, переключение режимов. Это сопровождается образованиями вихрей, «выпрыгивающих» вдоль стенки то влево, то вправо.

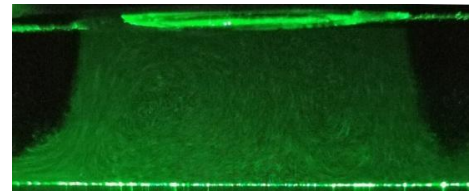


Рис. 2. Визуализация импактной кольцевой струи. Re=5500.

Изменение режимов течения значительно влияет на процесс охлаждения кольцевой струи и представляет серьезный интерес в исследовании тепломассообмена кольцевой импактной струи.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-58-26003 Чехия_а) и государственного контракта № 121031800217-8.

Список литературы

1. **В.И. Терехов, С.В. Калинина, К.А. Шаров** Конвективный теплообмен при натекании кольцевой струи на плоскую преграду//ТВТ, 2018, том 56, № 2, с. 229–234.
2. **В.В. Вышинский, А.Г. Наливайко, Л.В. Носачев** Исследования пульсирующей смыкающейся кольцевой струи // Научный вестник МГТУ ГА. 2010, № 154, С. 13—19.
3. **Zhen H.S., Leung C.W., Cheung C.S.** Heat Transfer Characteristics of an Impinging Premixed Annular Flame Jet// Applied Thermal Engineering. 2012. V. 36. P. 386-392.
4. **Yang H.Q., Kim T.B., Lu T.J.** Characteristics of Annular Impinging Jets with/without Swirling Flow by Short Guide Vanes// Science China, Techn. Sci. 2011. V.54 No.3. P. 749–757.
5. **Travnicek Z., Tesar V.** Hysteresis in Annular Impinging Jets// Exp. Thermal and Fluid Science. 2013. V. 44. P. 565-570.

M.V. Philippov, I.N. Baranov

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

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HEAT AND MASS TRASFER OF ANNULAR IMPACT JETS

УДК 532.526.4

Н.А. Киселёв[1], *Ю.А. Виноградов*[1], *А.Г. Здитовец*[1]

[1] Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова
Россия 119192 Москва, Мичуринский проспект, 1

ТЕПЛООБМЕН И ТРЕНИЕ ПРИ НЕРАВНОВЕСНОМ ПОЛОЖИТЕЛЬНОМ ГРАДИЕНТЕ ДАВЛЕНИЯ

Исследования динамических пограничных слоев с положительным градиентом давления ведутся уже почти столетие [1,2]. При этом наблюдаются многочисленные разногласия - как в подходах, так и в результатах экспериментальных и численных работ. Тепловые пограничные слои обделены таким пристальным вниманием, однако разногласия присутствуют и здесь.

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования коэффициентов теплоотдачи и трения при наличии слабого и умеренного неблагоприятного неравновесного продольного градиента давления.

Экспериментальные исследования проводились на малой дозвуковой аэродинамической трубе [3,4]. Щелевой рабочий канал имел длину 1190 мм, высоту 50мм и ширину 300 мм. Нижняя стенка канала была выполнена нагреваемой. Рабочий канал состоял из 2-х секций. Первая секция длиной 920 мм и постоянного поперечного сечения служила для развития пограничных слоев на нижней стенке. Вторая секция длиной 270 мм служила для создания продольного градиента давления. В этой секции на нижней стенке располагалась модель на плавающем элементе. Верхняя стенка была прямолинейной и подвижной – в ходе экспериментов угол раскрытия изменялся в диапазоне 0-14° с шагом в 1°. Для измерения профиля статического давления нижняя стенка была дренирована на участке градиента давления с шагом в 10 мм. Скорость потока на входе в канал для всех конфигураций канала составляла 50 м/с.

Коэффициент трения на гладкой поверхности при течении с градиентом давления определялся двумя способами – по измеренному профилю скорости на логарифмическом участке пограничного слоя и взвешиванием модели на плавающем элементе. Для измерения профилей скорости использовался однокомпонентный термоанемометр. Датчик был установлен на координатное устройство, позволявшее перемещать его в любую точку секции с градиентом давления в диапазоне длин 10…220мм от начала участка с точностью 0.02 мм в нормальном к стенке направлении. Плавающий элемент был подвешен на однокомпонентных тензометрических весах. Для учета усилия, вызванного перепадом статического давления на длине элемента, в переднем и заднем зазорах плавающего элемента установлены отборники давлений. Длина плавающего элемента - 125 мм, ширина –

100 мм. Плавающий элемент был установлен на расстоянии 80 мм от начала участка с градиентом давления. Для определения коэффициента теплоотдачи применялся метод нестационарного теплообмена.

На основании проведенных экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы о влиянии неравновесного продольного положительного градиента давления на коэффициенты трения, теплоотдачи и фактора Рейнольдса в турбулентном пограничном слое на гладкой поверхности:

· Универсальный логарифмической профиль скорости сохраняется в рассматриваемом диапазоне параметров течения.

· Параметры профиля скорости (формпараметры H и G, параметр следа П) существенно увеличиваются с ростом градиента давления.

· Как локальный, так и осредненный относительный коэффициенты трения также существенным образом зависят от безразмерного параметра градиента давления - снижаются с ростом параметра градиента давления.

· Безразмерный относительный коэффициент теплоотдачи на гладкой поверхности снижается при наличии градиента давления, однако, это снижение на такое существенное, как у относительного коэффициента трения.

· Фактор аналогии Рейнольдса растет с увеличением продольного градиента давления. Отношение относительного коэффициента теплоотдачи к относительному коэффициенту трения достигало 1.16 при максимальном значении параметра градиента.

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда (проект №19-79-10213).

Список литературы

1. **K. Pohlhausen**, Zur näherungsweisen Integration der Differentialgleichung der Iaminaren Grenzschicht, ZAMM - J. Appl. Math. Mech. / Zeitschrift Für Angew. Math. Und Mech. 1 (1921) 252–290.
2. **F.H. Clauser**, Turbulent Boundary Layers in Adverse Pressure Gradients, J. Aeronaut. Sci. 21 (1954) 91–108.
3. **A.I. Leontiev, N.A. Kiselev, Y.A. Vinogradov, M.M. Strongin, A.G. Zditovets, S.A. Burtsev**, Experimental investigation of heat transfer and drag on surfaces coated with dimples of different shape, Int. J. Therm. Sci. 118 (2017) 152–167.
4. **N.A. Kiselev, A.I. Leontiev, Y.A. Vinogradov, A.G. Zditovets, M.M. Strongin**, Effect of large-scale vortex induced by a cylinder on the drag and heat transfer coefficients of smooth and dimpled surfaces, Int. J. Therm. Sci. 136 (2019) 396–409.

N.A. Kiselev[1], Yu.A. Vinogradov[1],A.G. Zditovets[1]

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

HEAT TRANSFER AND SKIN-FRICTION IN A NONEQUILIBRIUM ADVERSE PRESSURE GRADIENT

УДК 532.526.4

Н.А. Киселёв[1], *Д.Е. Хазов*[1], *Ю.А. Виноградов*[1]

[1] Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова
Россия 119192 Москва, Мичуринский проспект, 1

ТРЕНИЕ И ТЕПЛООБМЕН В КАНАЛЕ ПРИ ТЕЧЕНИИ ЗА ЦИЛИНДРОМ

Согласно ряду работ [1,2], установка различных манипуляторов (лент, аэродинамических профилей, цилиндров) в пограничный слой на гладкой пластине приводит к существенному нарушению аналогии Рейнольдса: снижение трения в пограничном слое на стенке (до 30% [1]) за манипулятором сопровождается интенсификацией теплообмена (до 1.9 раза [2]). Однако больший практический интерес представляют течения в трубах и каналах. В данной работе проведено экспериментальное и численное исследование коэффициентов теплоотдачи и трения на гладкой поверхности, расположенной в щелевом канале в следе за цилиндром.

Экспериментальные исследования проводились на малой дозвуковой аэродинамической трубе [3,4]. Щелевой рабочий канал имел длину 1080 мм, высоту 30мм и ширину 300 мм. Для исследования коэффициентов теплоотдачи нижняя стенка канала выполнена нагреваемой. На оси канала поперек потока (параллельно нижней стенке) устанавливался круговой цилиндр, задняя кромка которого располагалась на расстоянии 700 мм от начала канала. Исследовались следующие диаметры цилиндра: 2.75, 3.2, 4.2, 5.8, 7.4 и 8 мм. Скорость потока на входе в канал для всех конфигураций канала составляла 50 м/с. Во время экспериментов регистрировались:

· профили осредненной и пульсационной компонент скорости (в сечениях 1-10 мм с шагом в 1 мм, в сечениях 20-100 мм с шагом в 10 мм и в сечении 120 мм от задней кромки цилиндров) с помощью однокомпонентного термоанемометра;

· Суммарное усилие, вызванное касательным напряжением на участке 0-120 мм от задней кромки цилиндров с помощью плавающего элемента;

· темп охлаждения гладкой поверхности (на участке 0-120 мм от задней стенки) с помощью ИК-камеры;

· профили статического давления на нижней стенке канала на участке -45…145 мм (с шагом 10 мм) от задней кромки цилиндров.

Коэффициент трения определялся двумя способами – по измеренному профилю скорости на логарифмическом участке пограничного слоя, и взвешиванием модели на плавающем элементе. В первом случае определяется локальный коэффициент трения, во втором - осредненный по длине плавающего элемента (на участке 0…120 мм). Для определения коэффициента теплоотдачи применялся метод нестационарного теплообмена.

Двумерная задача решалась при помощи коммерческого пакета ANSYS Fluent. Течение моделировалось в стационарной постановке. При построении сетки использовался препроцессор ANSYS ICEM CFD. При моделировании использовался метод пересекающихся сеток. Дискретизация уравнений Навье-Стокса осреднённых по Рейнольдсу (RANS), уравнения энергии и уравнений соответствующей модели турбулентности проводилась на основе метода контрольного объёма. При проведении численного моделирования скорость потока на входе в канал также составляла 50 м/с.

Получены следующие результаты:

· универсальный логарифмической профиль скорости сохраняется в рассматриваемом диапазоне параметров течения и геометрий канала. Осредненные коэффициенты трения, определенные по профилю скорости и с помощью плавающего элемента совпадают;

· коэффициенты трения и теплоотдачи в следе за цилиндром (на участке 3-120 мм от задней кромки) всегда выше, чем в канале без цилиндра и растут с увеличением диаметра цилиндра. Формпараметр пограничного слоя при этом всегда ниже формпараметра невозмущенного пограничного слоя;

· осредненные на участке 0-120 мм коэффициенты трения всегда выше, чем коэффициенты теплоотдачи.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 18-08-00413 и СП- СП-4172.2021.1.

Список литературы

1. **F. de Souza, J. Delville, J. Lewalle, J.P. Bonnet**, Large scale coherent structures in a turbulent boundary layer interacting with a cylinder wake, Exp. Therm. Fluid Sci. 19 (1999) 204–213.
2. **K. Suzuki, H. Suzuki, Y. Kikkawa, Y. Kawaguchi**, Study on a Turbulent boundary Layer Disturbed by a Cylinder-Effect of Cylinder Size and Position, Turbul. Shear Flows. 7 (1991) 119–135.
3. **A.I. Leontiev, N.A. Kiselev, Y.A. Vinogradov, M.M. Strongin, A.G. Zditovets, S.A. Burtsev**, Experimental investigation of heat transfer and drag on surfaces coated with dimples of different shape, Int. J. Therm. Sci. 118 (2017) 152–167.
4. **N.A. Kiselev, A.I. Leontiev, Y.A. Vinogradov, A.G. Zditovets, M.M. Strongin**, Effect of large-scale vortex induced by a cylinder on the drag and heat transfer coefficients of smooth and dimpled surfaces, Int. J. Therm. Sci. 136 (2019) 396–409.

N.A. Kiselev[1], *D.E. Khazov*[1], *Yu.A. Vinogradov*[1]

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

HEAT TRANSFER AND SKIN-FRICTION IN CHANNEL WITH FLOW BEHIND A CYLINDER

УДК 621.9

А.Н. Сухановский[1], *А.В. Евграфова*[1]

[1] Институт механики сплошных сред ПФИЦ УрО РАН,
Пермь, 614013, Ак. Королева, 1

ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА ДЛЯ ОДНОРОДНЫХ И СМЕШАННЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

При исследовании конвективного теплообмена часто встает вопрос о зависимости эффективности теплопереноса от ключевых параметров задачи. В качестве критерия эффективности при этом выступает число Нуссельта – отношение полного потока тепла к теплопроводному.

На сегодняшний день наиболее подробно процессы теплообмена изучены для случая однородного нагрева снизу (классическая конвекция Рэлея-Бенара). Существует большой кластер исследований, которые рассматривают влияние свойств жидкости, величины надкритичности и свойств поверхности на интенсификацию теплообмена для конвекции Рэлея-Бенара [1-3].

Другим случаем, который представляет большой интерес, является случай неоднородного нагрева. Теплообмен в таких системах может зависеть не только от свойств жидкости и поверхности, но и от конфигурации нагреваемых областей. Однако в [4] было показано, что для любого типа граничных условий, когда число Нуссельта становится гораздо больше единицы, высота температурного пограничного слоя и соответственно эффективность теплообмена практически не зависит от толщины слоя жидкости и структуры течения.

В данной работе мы хотим проверить это предположение. Объектом исследования является конвекция от локализованного источника тепла в горизонтальном слое жидкости (рис. 1).

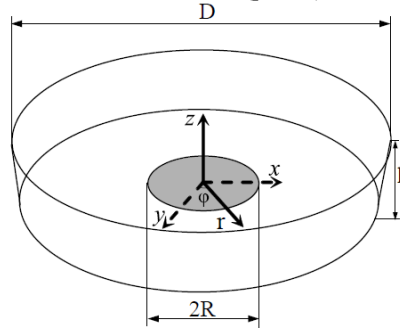


Рис.1 Схематическое изображение экспериментальной установки

В эксперименте варьировались следующие параметры: высота слоя жидкости h, диаметр нагревателя $2R$, диаметр модели D, мощность нагрева и свойства рабочей жидкости. Для всего диапазона управляющих параметров получена зависимость числа Нуссельта от числа Рэлея, проведено сравнение результатов с предыдущими исследованиями. На основе полученных данных выявлены общие закономерности конвективного теплопереноса для однородных и смешанных граничных условий. Подробно результаты работы изложены в [5].

Работа выполнена при поддержке Правительства Пермского края (проект № С-26/788.

Список литературы

1. **G. Ahlers, S. Grossmann, and D. Lohse** Heat transfer and large scale dynamics in turbulent rayleigh-benard convection // Reviews of modern physics. 2009. 81. 503.
2. Physics of Buoyant Flows: From Instabilities to Turbulence / M. K. Verma. World Scientific. Singapore. 2018. 326 p.
3. **S. Wagner and O. Shishkina** Aspect-ratio dependency of Rayleigh-Benard convection in box-shaped containers // Physics of Fluids. 2013. 25. 085110.
4. **G. Golitsyn.** Simple theoretical and experimental study of convection with some geophysical applications and analogies // Journal of Fluid Mechanics. 1979. 95. 567–608.
5. **A. Sukhanovskii, A. Evgrafova** Dependence of boundary layer thickness on layer height for extended localised heaters // Experimental Thermal and Fluid Science, 2020,110275

A.N. Sukhanovskii [1], *A.V. Evgrafova*[1]

[1] Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS,
Russia, 614013, Perm, Academician Korolev Street, 1

CONVECTIVE HEAT TRANSFER FOR HOMOGENEOUSE AND MIXED BOUNDARY CONDITIONS

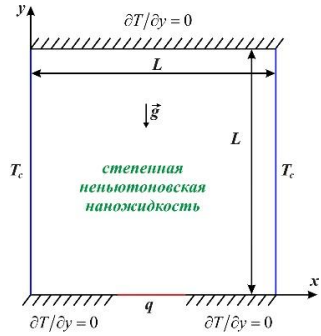
УДК 536.24

Д.С. Лоенко, М.А. Шеремет

Томский государственный университет, научно-исследовательская лаборатория моделирования процессов конвективного тепломассопереноса, Томск, 634050, пр. Ленина, 36 (•)

ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА НАНОЧАСТИЦ И ИХ ОБЪЕМНОЙ ДОЛИ НА ЕСТЕСТВЕННУЮ КОНВЕКЦИЮ НЕНЬЮТОНОВСКОЙ НАНОЖИДКОСТИ В КВАДРАТНОЙ ПОЛОСТИ С ЛОКАЛЬНЫМ ИСТОЧНИКОМ ЭНЕРГИИ

Естественно-конвективный теплоперенос в замкнутых полостях является достаточно распространенным явлением во многих инженерных приложениях: теплообменниках, энергетических системах, а также встречается при создании пассивных систем охлаждения электронных элементов. Системы пассивного охлаждения, основанные на развитии свободноконвективного теплообмена, имеют ряд преимуществ, таких как низкое энергопотребление, надежность, слабый шум, легкость реализации и низкая стоимость. Эффективность таких систем сильно зависит от теплофизических свойств рабочего тела. Таким образом, одним из возможных способов улучшения теплообменных характеристик системы является замена традиционных охлаждающих сред наножидкостями, эффективная теплопроводность которых, как известно, выше, чем у чистого базового теплоносителя (вода, масло) [1].



В данном исследовании проводится численный анализ влияния материала наночастиц и их объемной доли на естественную конвекцию неньютоновской степенной наножидкости в квадратной замкнутой полости с тепловыделяющим участком нижней стенки полости. Геометрическая постановка задачи представлена на рисунке 1.

Исследуемая полость заполнена неньютоновской степенной наножидкостью. В качестве базовой неньютоновской среды использовалась смесь карбоксилметилцеллюлоза/вода (0.0%-0.3%), которая проявляет псевдопластический харак-

(•) Д.С. Лоенко, d.s.loenko@mail.tsu.ru

тер. В качестве материала наночастиц были использованы следующие вещества: Cu, Al_2O_3, CuO, TiO_2. Характеристики базовой смеси и материалов наночастиц представлены в [2].

Неньютоновский характер поведения базовой жидкости описывается степенной моделью Оствальда-де-Виля [3]:

$$\tau_{ij} = 2\mu_{eff} D_{ij} = 2K\left(2D_{kl}D_{kl}\right)^{\frac{n-1}{2}} D_{ij} \qquad (1)$$

Краевая задача математической физики была сформулирована на основе законов сохранения массы, импульса и энергии в преобразованных переменных «функция тока – завихренность». Численное моделирование было проведено с использованием метода конечных разностей [4]. Полученные результаты проанализированы с помощью построения распределений изолиний функции тока и температуры, а также на основе зависимостей среднего числа Нуссельта и средней температуры от времени и определяющих параметров.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-79-20141).

Список литературы

1. **Borode A.O., Ahmed N.A., Olubambi P.A.** A review of heat transfer application of carbon-based nanofluid in heat exchangers // Nano-Structures & Nano-Objects. – 2019. – Vol. 20. – 100394.
2. **Maleki H., Safaei M.R., Alrashed A.A.A.A., Kasaeian A.** Flow and heat transfer in non-Newtonian nanofluids over porous surfaces // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2019. – Vol. 135. – Pp. 1655–1666.
3. **Shenoy A.** Heat Transfer to Non-Newtonian Fluids: Fundamentals and Analytical Expressions. – Wiley: Hoboken, 2018.
4. **Лоенко Д.С., Шеремет М.А.** Конвективный теплоперенос степенной жидкости в полости с источником энергии нестационарного объемного тепловыделения // Вестник Пермского университета. Физика. – 2019. – № 4. – С. 44 – 50.

D.S. Loenko, M.A. Sheremet

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

INFLUENCE OF NANOPARTICLES MATERIAL AND VOLUME FRACTION ON NON-NEWTONIAN NANOFLUID NATURAL CONVECTION IN A SQUARE CAVITY WITH A LOCAL HEATER

УДК 519.6:533.6.011

И.А. Шишкина, Е.В. Колесник

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29(□)

ВЛИЯНИЕ ЧИСЛЕННОЙ СХЕМЫ НА РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ДВУМЕРНОГО ТЕЧЕНИЯ В ТРАНСЗВУКОВОЙ РЕШЕТКЕ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА

В случае сверхзвукового натекания газа на лопатки венца осевого компрессора, когда на входе в межлопаточный канал формируется скачок уплотнения, качество численного воспроизведения ключевых особенностей ударно-волнового взаимодействия, включая взаимодействие скачка уплотнения с пограничным слоем, во многом определяется выбором схемы для аппроксимации конвективных потоков.

В настоящей работе тестовые двумерные расчеты данной направленности проводились для двух трансзвуковых компрессорных решеток, экспериментальные данные для которых представлены в [1, 2]. Для выполнения основной серии расчетов использовался конечно-объемный «неструктурированный» программный код SINF/Flag-S, разрабатываемый в ИПММ СПбПУ. В ветви кода, предназначенной для расчетов сжимаемых течений вязкого газа, авторами реализован широкий набор схем аппроксимации конвективных потоков второго порядка точности. Кросс-верификационные расчеты проводились с применением коммерческого пакета ANSYS Fluent 16.2. В обоих случаях решались осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса, замкнутые по однопараметрической модели турбулентности Спаларта-Аллмараса.

В качестве примера результатов кросс-верификационных расчетов на рис. 1 представлены распределения коэффициента давления вдоль профиля лопатки рабочего колеса компрессора, полученные для одного из режимов течения, исследованных в [1]. В этом режиме реализуется безотрывный режим обтекания, входное число Маха равно 1.03, входной угол между направлением потока и фронтом решетки, β_1, составляет 147 градусов (рис. 1a). Стационарные решения, полученные с применением двух кодов на тождественных сетках (размерностью ~13 тыс. ячеек) очень близки, при этом они находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными (рис. 1b).

(•) И.А. Шишкина, irina-shishkina-1998@mail.ru

Детальное исследование влияния численных схем проводилось для исследованного в [2] режима течения, при котором взаимодействие косого скачка уплотнения с пограничным слоем на лопатке приводит к формированию отрывного пузыря. Сопоставительные расчеты по коду SINF/Flag-S были проведены с использованием нескольких схем аппроксимации конвективных потоков: схемы Годунова, Роу, HLL(C), AUSM(+up), AUSMD, SLAU. Второй порядок точности схем достигается посредством применения MUSCL подхода к реконструкции переменных с использованием различных ограничителей. Получен ряд заключений о влиянии выбора схемы и вида ограничителя на сходимость итерационного решения и качество сошедшегося решения, с акцентом на область взаимодействия скачка уплотнения и пограничного слоя.

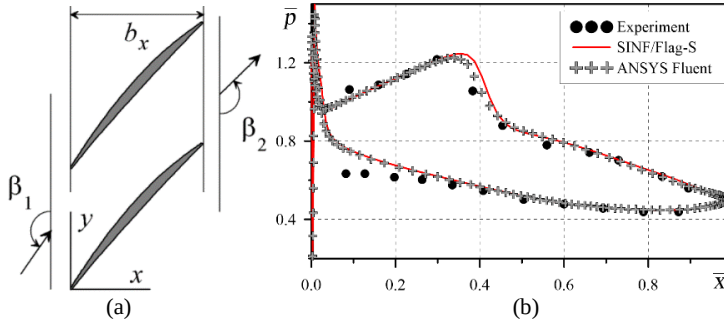


Рис. 1. Схема течения (a) и расчетные распределение коэффициента давления вдоль обвода профиля в сопоставление с опытными данными [1] (b)

Список литературы

1. **Шрейбер, Х.А., Штаркен Х.** Исследование течения в элементарном венце трансзвукового компрессора методом испытаний решетки; пер. с англ. // Труды ASME. Энергетические машины. –Т. 106, №2 – 1984. – с. 12–21.
2. **Weber A. et al** 3-D transonic flow in a compressor cascade with shock- induced corner stall // Trans. ASME. J. Turbomachinery. – V. 124. – 2002. – P. 358–366.

I.A. Shishkina, E.V. Kolesnik

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

STUDY OF NUMERICAL SCHEME EFFECTS IN CALCULATIONS OF TWO-DIMENSIONAL FLOW IN TRANSONIC AXIAL COMPRESSOR CASCADE

УДК 536.24

М.С. Астанина, М.А. Шеремет

Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, Томск, пр. Ленина, 36 (•)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОГРАВИТАЦИОННОЙ КОНВЕКЦИИ ЖИДКОСТИ ПЕРЕМЕННОЙ ВЯЗКОСТИ В КУБИЧЕСКОЙ ПОРИСТОЙ ПОЛОСТИ С ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ

Теоретическое изучение конвективного тепломассопереноса является одним из востребованных направлений фундаментальной науки, так как имеет много практических приложений. Подобные задачи актуальны во многих отраслях промышленности: приборостроение, микроэлектроника, строительство зданий и др. Особый интерес вызывают задачи моделирования систем охлаждения для нагревателей различных типов [1, 2].

Целью настоящей работы является математическое моделирование свободноконвективного теплопереноса в пористой кубической полости, заполненной жидкостью переменной вязкости, при наличии тепловыделяющего элемента на нижней поверхности (рис. 1). Боковые границы полости поддерживаются при постоянной температуре охлаждения, в то время как горизонтальные поверхности считаются теплоизолированными. В роли рабочей среды рассматривается ньютоновская теплопроводная жидкость, которая удовлетворяет приближению Буссинеска, и её вязкость зависит от температуры по экспоненциальному закону. Для описания взаимодействия пористого скелета и жидкости используется локально-равновесная тепловая модель.

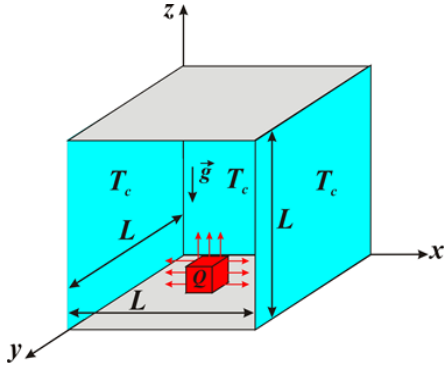


Рис. 1. Область решения

Математическая модель для описания изучаемого процесса строится в безразмерных преобразованных переменных «векторный потенциал – вектор завихрённости». Сформулированные дифференциальные

(•) М.С.Астанина, astanina.marina@bk.ru

уравнения вместе с начальными и граничными условиями разрешаются методом конечных разностей на равномерной сетке [2].

В результате проведённых исследований были показаны основные закономерности тепломассообмена в виде трёхмерных распределений температуры, вертикальной компоненты скорости, а также зависимостей среднего числа Нуссельта на источнике от времени и определяющих параметров. В качестве определяющих параметров выступают безразмерные числа Дарси, Рэлея и Остроградского, а также параметр изменения вязкости рабочей жидкости.

Работа выполнена в рамках реализации проекта Российского фонда фундаментальных исследований (договор № 20-31-90080).

Список литературы

1. **Purusothaman A., Murugesan K., Chamkha A.J.** 3D modeling of natural convective heat transfer from a varying rectangular heat generating source // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2019. V. 138. Pp. 597–608.
2. **Gibanov N.S., Sheremet M.A.** Natural convection in a cubical cavity with different heat source configurations // Thermal Science and Engineering Progress. 2018. V. 7. Pp. 138–145.

M.S. Astanina, M.A. Sheremet

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

NUMERICAL SIMULATION OF NATURAL CONVECTION OF FLUID WITH VARIABLE VISCOSITY IN A CUBICAL POROUS CAVITY IN THE PRESENCE OF HEAT-GENERATING ELEMENT

УДК 621.9

Е.А. Михайлов[1], *И.О. Тепляков*[2], *К.Ю. Малышев*[1], *Е.П. Георгиевская*[1]

[1] Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Москва, 119991, Ленинские горы, 1(•)

[2] Объединенный институт высоких температур РАН,
111116, Москва, Красноказарменная, 17А

РОЛЬ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ ОПИСАНИИ ЭЛЕКТРОВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ

Электровихревые течения возникают при прохождении электрического тока переменной плотности через проводящую среду. Они играют важную роль при исследовании процессов, возникающих при электрошлаковом переплаве металлов, электросварке и других электрометаллургических процессах.

Изучение электровихревых течений ведется на протяжении нескольких десятилетий различными коллективами. Так, можно отметить результаты, полученные под руководством В.В.Бояревича и Э.В.Щербинина в Институте физики Латвийского Университета (г.Рига) [1]. Большой вклад внесли коллективы, работающие в Объединенном институте высоких температур (г.Москва) [2], Институте механики сплошных сред УрО РАН (г.Пермь) [3], Магнитогорском техническом университете им. Г.И.Носова [4], а также ряд научных групп в Западной Европе [5]. Отметим, что исследования проводятся как экспериментально, так и с помощью различных теоретических моделей.

Первые работы были посвящены точным решениям и построению асимптотических приближений. Вместе с тем, постепенно шло развитие численных методов, а также росли возможности вычислительной техники. Это позволяет получать в большинстве случаев решения, которые являются гораздо более точными. Тем не менее, численные результаты обладают рядом недостатков. Так, в случае зависимости от большого числа параметров оказывается проблематичным выяснить принципиальные закономерности и качественную картину решения. По этой причине использование аналитических решений оказывается актуальным и по сей день. Вместе с тем, как правило, подобные решения связаны с линейными или слабо нелинейными приближениями, и возникает вопрос о применимости таких подходов.

Особую роль играют течения в полусферическом сосуде.

В безразмерных переменных в сферических координатах система уравнений в стационарном случае будет выглядеть так:

(•) Е.А. Михайлов, ea.mikhajlov@physics.msu.ru

$$(\mathbf{v}\nabla)\mathbf{v} = \frac{1}{\sqrt{S}}\Delta\mathbf{v} - \nabla p + \frac{\cos\theta - 1}{4\pi^2 r^3 \sin\theta}\mathbf{e}_{\boldsymbol{\theta}} - \frac{\alpha \sin\theta}{2\pi r^2}\mathbf{e}_{\varphi};$$

$$\nabla\mathbf{v} = 0, \quad 0 < \theta < \frac{\pi}{2}, \quad a < r < b;$$

$$\mathbf{v}\big|_{r=a} = \mathbf{v}\big|_{r=b} = \frac{\partial v_r}{\partial\theta}\bigg|_{\theta=\frac{\pi}{2}} = \frac{\partial v_\varphi}{\partial\theta}\bigg|_{\theta=\frac{\pi}{2}} = v_\theta\big|_{\theta=\frac{\pi}{2}} = 0;$$

где S – параметр электровихревого течения, α - параметр внешнего магнитного поля.

Нами было проанализировано, в каких случаях можно пренебречь левой частью (нелинейным конвективным слагаемым) данных уравнений. Получено, что в определенном диапазоне значений параметров численное решение нелинейной задачи мало отличается от аналитического решения линейной задачи.

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. **Жилин В.Г., Ивочкин Ю.П., Тепляков И.О.** К вопросу о закрутке осесимметричных электровихревых течений // ТВТ. 2011. Т. 49. № 6. С. 957—960.
3. Электровихревые течения в каналах МГД-устройств/ Хрипченко С.Ю. Екатеринбург: УрО РАН, 2009.
4. **Ячиков И.М., Портнова И.В., Ларина Т.П.** Исследование на физической модели поведения токонесущей жидкости в ванне ДППТ под действием внешнего вертикального магнитного поля // Известия ВУЗов. Черная металлургия. 2018. № 1. С. 28—34.
5. **Sozou C., Pickering W.M.** Magnetohydrodynamic flow due to the discharge of an electric current in a hemispherical container// J.Fluid. Mech., V.73, P.641 – 650.

E.A. Mikhailov [1], I.O. Teplyakov [2], K.Yu. Malyshev[1], E.P. Georgievskaya[1]

[1] Lomonosov Moscow State Technical University,
Russia 119991 Moscow, Leninskie gori, 1
[2] Joint Institute of High Temperature,
Russia, 111116 Moscow, Krasnokazarmennaya, 17A

ROLE OF NONLINEAR EFFECTS WHILE DESCRIPTION OF ELECTROVORTEX FLOWS

УДК 501

И.С. Миронов[1], Н.Ю. Пятницкая[1,2], Н.А. Лучинкин[1,2], И.А. Беляев[1,2]
Е.В. Свиридов[2]

[1] ОИВТ РАН, Ижорская 13 Стр.2, Москва 125412, Россия
[2] НИУ МЭИ, Красноказарменная 14, Москва 111250, Россия

ПЛОСКАЯ СТРУЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОПЕРЕЧНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В данной работе проведено экспериментальное исследование погружения плоского струйного потока жидкого металла в квадратный канал под действием поперечного магнитного поля. Рассмотрены два случая, когда магнитное поле прикладывается параллельно к исходному направлению струи (компланарному) или поперек него. Основной целью настоящей работы является исследование усредненных характеристик и этапов экспериментов по преобразованию струи при условии возможности наблюдения сигналов продольной скорости потока.

Рассматривается изотермический плоский струйный поток жидкого металла, входящий в квадратный канал (Рис.1). Поток управляется градиентом давления $\partial P0/\partial x$ в направлении потока x.

В качестве модельной жидкости используется ртуть, которая циркулирует по замкнутому контуру. Внутри электромагнита создается магнитное поле до 1.8 Тл. Канал представляет из собя плоскую щель с внутренним размером 8x56 мм из нержавеющей стали толщиной 2 мм, которая крепится непосредственно к каналу 56x56 мм.

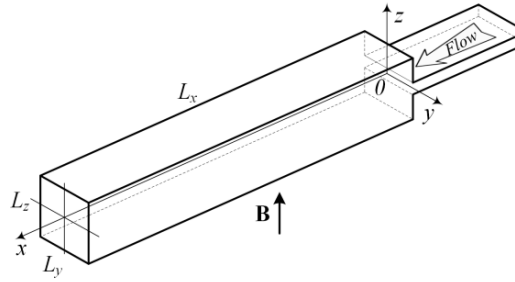


Рис.1 Конфигурация течения

Измерения поперечной составляющей скорости производятся с помощью датчика потенциала. В данной работе использовался 4-электродный датчик, позволяющий одновременно производить измерения скорости с двух пар электродов.

В результате рассмотрены течения при характерных числах Рейнольдса от 1000 до 6000 и числа Гартмана от 200 до 1300 (рассчитанные по полувысоте расширенного канала).

Наблюдаемые течения сопровождаются развитием существенно нестационарной картины, несмотря на то, что с точки зрения канального течения режим как в струе до выхода в полость, так и в полости является существенно докритическим (ламинарным) при рассмотренных величинах магнитного поля. В каждом случае возникновение подобных явлений может быть вызвано несколькими причинами: трансформацией струи под действием магнитного поля на начальной стадии своей эволюции, влиянием начальных условий, особенностями геометрии экспериментального участка.

Для компланарных струй удалось определить принципиальные границы возникновения неустойчивостей в пространстве безразмерного МГД-критерия - числа Стюарта (N) $10<N<1000$. Обнаруженные эффекты требуют продолжения экспериментального исследования методами, позволяющими абстрагироваться от возможного влияния геометрии и начальных условий.

Для поперечных струй, расположенных поперечно к магнитному полю, получена ожидаемая трансформация струи в пристенные струи, расположенные перпендикулярно к изначальному направлению струи. Впервые показана существенная нестационарность этого процесса в широком диапазоне режимных параметров и оценены характерные длины (вдоль канала) стадий этого процесса.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 20-69-46067.

I.S. Mironov [1], N.Yu. Pyatnickaya[1,2] ,N.A. Luchinkin[1,2], I.A. Belyaev[1,2] E.V. Sviridov[1,2]

Joint Institute for High Temperatures of RAS (JIHT RAS), Moscow, Russia
Moscow Power Engineering Institute MPEI, Moscow, Russia

FLAT LIQUID METAL JET AFFECTED BY A TRANSVERSE MAGNETIC FIELD

УДК 533

Е.А. Сковородкин, С.В. Веретенников, О.А. Евдокимов

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

БЕСКОНТАКТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ОГРАНИЧЕННОГО ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА

Вихревой эффект, или эффект Ранка, проявляется в закрученном потоке вязкого сжимаемого газа и реализуется в простом устройстве, называемом вихревой трубой (трубой Ранка – Хилша) [1]. Если в осесимметричный канал через сопловой ввод закручивающего устройства подать сжатый газ, то при определенных условиях в нем произойдет разделение на два потока: горячий – движущийся в прямотоке и холодный – в противотоке.

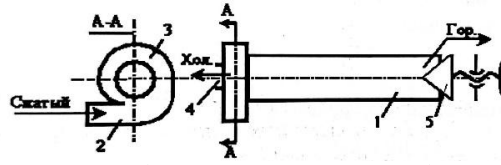


Рис. 1 Схема вихревой трубы: 1 – цилиндрическая труба; 2 - тангенциальное сопло; 3 - улитка; 4 – диафрагма с осевым отверстием; 5 – дроссель [1]

Вихревые трубы широко применяются в авиационной, энергетической, нефтехимической и других отраслях промышленности. Это обусловлено тем, что они способствуют интенсификации процессов переноса энергии, массы и импульса в элементах конструкций технических устройств. В свою очередь все эти эффекты напрямую зависят от структуры закрученного потока, пространственной пульсации, нестационарных вихрей и других процессов.

Локальные параметры потока, например, структура течения, до сих пор не поддаются тщательному исследованию, так как нет однозначных зависимостей того, как на масштабные и спиральные вихри влияет геометрия вихревой трубы, при каких параметрах они начинают разрушаться, и когда возникают возвратные течения в приосевой области. Все эти вопросы требуют дополнительного изучения.

В настоящее время известно, что наиболее полную информацию о локальных параметрах потока можно получить только с помощью бесконтактных методов, которые не вносят возмущения в основной поток. Одним из таких является метод цифровой трассерной анемометрии (PIV), в котором визуализация течения происходит благодаря частицам-трассерам, движущимся в потоке. Эти частицы засвечивает высо-

кочастотный лазер, а исследуемая область фиксируется скоростной камерой. Данный метод позволяет более глубоко изучить особенности течения и произвести необходимую коррекцию теоретического описания с учетом новых опытных и расчетных данных.

В предложенной работе проведены экспериментальные исследования закрученного потока в вихревой противоточной трубе с применением метода PIV. Определены распределения окружной и осевой компонент скорости в продольном и поперечном сечении камеры энергоразделения. На основе полученных данных определены осредненные и пульсационные составляющие скорости. Эксперименты выполнены при различных соотношениях осевых импульсов приосевого и периферийного течений.

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

Список литературы

1. **Пиралишвили Ш.А.** Вихревой эффект (Физическое явление, эксперимент, теоретическое моделирование) / Ш.А. Пиралишвили – М.: ООО «Научтехлитиздат», 2012. – 342 с.

E.A. Skovorodkin, S.V. Veretennikov, O.A. Evdokimov

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

AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE FLOW STRUCTURE IN AN ENERGY SEPARATION CHAMBER OF THE VORTEX TUBE

УДК 534

И.А. Меньшаков[1], *С.В. Веретенников*[1]

[1] Рыбинский государственный авиационный технический университет
имени П. А. Соловьёва,
Рыбинск, 152934, ул. Пушкина, д. 53

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРА АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ

Одной из наиболее важных характеристик вихревой трубы является её эффективность. Для нахождения наиболее оптимального режима подогрева рабочего тела необходимо осознавать особенности явлений, оказывающих влияние на процесс энергоразделения. В исследовании предпринята попытка поиска взаимосвязи акустического шума, сопровождающего работу ВТ и эффективности процесса энергоразделения.

Одной из особенностей, сопровождающих работу вихревых устройств, является интенсивная генерация звуковых волн. Согласно стандартам безопасности труда, уровень шума на рабочих местах не должен превышать определённых значений. Тем не менее, присутствие акустических колебаний при работе вихревых устройств свидетельствует об их взаимосвязи с турбулентной структурой закрученного потока, и со всеми явлениями переноса, влияющими, в конечном счете, на перераспределение энергии между периферийным и приосевыми массами газа в вихревых трубах[1].

Основная цель исследования –экспериментальное определение эффектов и акустического излучения, сопровождающего работу вихревой трубы. Для эксперимента была использована ВТ с диаметром камеры энергоразделения 10 мм и относительной длинной 12 калибров [2]. В качестве раскручивающего устройства подогретого потока используется крестовина; для измерения температуры подогретого потока на поверхности крестовины установлена термопара. Также, хромель-алюмелевые термопары устанавливаются на сопловой ввод на входе и на выходе охлажденного потока.

Регулировка режимов работы вихревой трубы осуществлялась с помощью варьирования расхода на выходе «холодного» потока $G_{x,}$ что в свою очередь, определяло относительную долю холодного потока. Регулировка расходов осуществлялась с помощью расходомеров MassViewBronkhorstMV-306.

Эксперимент проводился при постоянном давлении, на входе (π=3,7), относительная доля охлажденного потока изменялась от μ=0 до μ=1. Замечено, что при изменении доли охлажденного потока μ до 0,9 изменение температуры подогретого потока составило $\Delta T_г$=28 К. При плавной регулировке доли «холодного» потока μ в области μ=0,93…0,95 наблюдалось резкое повышение температуры подогрето-

го потока $T_г$. Причем небольшое изменение μ приводило к увеличению температуры подогретого потока на $\Delta T_г$=42 К. При дальнейшем повышении доли холодного потока с μ=0,96 до μ=1 наблюдается резкое уменьшение температуры $T_г$ до изначальной. На режиме работы с наибольшей температурой подогретого потока $T_г$с помощью конденсаторного микрофона и анализатора спектра ZETLAB был получен широкий звуковой спектр. Методом быстрого преобразования Фурье были найдены пиковые значения частот в диапазоне 8-12 кГц. Вероятно, причиной резкого повышения температуры при малых расходах подогретого потока может служить неадиабатность стенок вихревой трубы, но учитывая мгновенную динамику изменения температуры $T_г$ нужно брать в расчёт влияние газодинамических волновых и пульсационных процессов, которые могут влиять на такой подогрев, подобно эффекту Гартмана-Шпренгера.

Обнаруженный эффект резкого роста температуры «горячего» потока в вихревой трубе при μ=0,93…0,95 может быть использован для создания эффективных вихревых устройств.

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

Список литературы

1. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения. / Ш.А. Пиралшвили, В.М. Поляев, М.Н. Сергеев.; Под ред. И.А. Леонтьева. М.: УНПЦ «Энергомаш», 2000. – 412 с.
2. **Бирюк, В.В.** Вихревой эффект (Технические приложения). Том 2 (Часть 1) / В.В. Бирюк, С.В. Веретенников, А.И. Гурьянов, Ш.А. Пиралишвили. – М.: «Научтехлитиздат», 2014. – 288 с.

I.A. Menshakov[1], S.V. Veretennikov[1]

[1]Rybinsk State Aviation Technical University named after P. A. Solvyov, Rybinsk, 152934, Pushkin st., 53

STUDY OF THE SPECTRUM OF ACOUSTIC RADIATION OF A VORTEX TUBE

УДК 533.6.011.6

С.С. Попович[1], *Н.А. Киселев*[1], *А.Г. Здитовец*[1]

[1] НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова,
Москва, 119192, Мичуринский проспект, 1 (•)

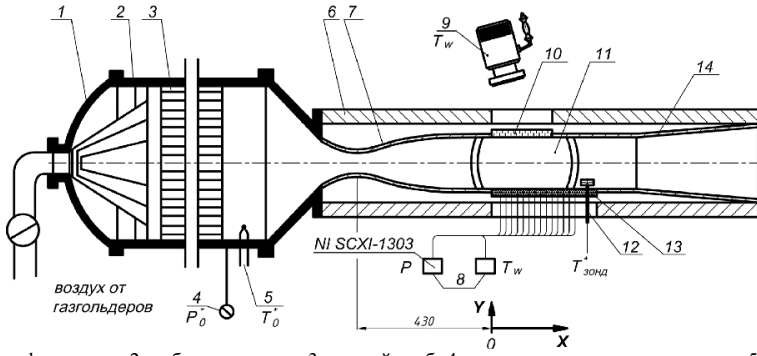
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОДОЛЬНОГО ГРАДИЕНТА ДАВЛЕНИЯ НА АДИАБАТНУЮ ТЕМПЕРАТУРУ СТЕНКИ ПРИ ОБТЕКАНИИ ЦИЛИНДРА СВЕРХЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ

Вследствие вязкой диссипации в пограничном слое сверхзвукового потока сжимаемого газа происходит перераспределение температуры торможения. В результате температура торможения во внутренней части пограничного слоя – адиабатная температура стенки – оказывается ниже, а во внешней части – выше, чем температура торможения в основном потоке. Определение адиабатной температуры стенки является одной из главных проблем при исследовании теплообмена сверхзвуковых потоков, поскольку ее непосредственное измерение в эксперименте затруднено [1].

Внешние воздействия (градиент давления, проницаемость стенки, форма и рельеф поверхности, скачки уплотнения и отрывные течения) могут приводить как к повышению аэродинамического нагрева в локализованной области, так и к охлаждению стенки. Известен эффект снижения адиабатной температуры стенки до значений ниже термодинамической температуры при поперечном обтекании дозвуковым сжимаемым потоком цилиндра в области задней критической точки (эффект Эккерта-Вайзе). За цилиндром (или, например, за выходной кромкой лопатки турбины) образуется вихревой след с температурной стратификацией по сечению вихря: в центре вихря полная температура ниже начальной, а на периферии – выше [2]. Для сверхзвуковых потоков снижение адиабатной температуры стенки фиксируется в следе за обтекаемым препятствием в виде клина, ребра или ступеньки.

Данная работа направлена на исследование температуры по обводу профиля цилиндра, обтекаемого сверхзвуковым потоком сжимаемого газа. Экспериментальное исследование проводится на базе сверхзвуковой аэродинамической установки АР-2 [3], на которой имеется возможность проведения бесконтактных исследований с помощью высокоскоростной ИК-камеры InfraTEC и иллюминатора из ZnSe (коэффициент пропускания 0.7), установленного на боковой стенке рабочей части установки.

(•) С.С. Попович, pss@imec.msu.ru



1 – форкамера; 2 – сборка конусов; 3 – хонейкомб; 4 – датчик давления торможения; 5 – термопара температуры торможения; 6 — рабочий канал; 7 – плоское регулируемое сопло; 8 – датчики статического давления и термопары; 9 – ИК-камера (тепловизор); 10 – инфракрасный иллюминатор; 11 – иллюминатор из оптического стекла; 12 – зонд для измерения температуры в пограничном слое; 13 – экспериментальная модель; 14 – диффузор

Рис. 1. Общий вид сверхзвуковой аэродинамической установки АР-2

Работа выполняется при поддержке гранта РНФ №19-79-10213.

Список литературы

1. **Neumann R.D., Freeman D.C.** Experimental measurement of aerodynamic heating about complex shapes at supersonic Mach numbers // Journal of Spacecraft and Rockets. 2012. V. 49. N. 6. P. 1080-1087.
2. **Aleksyuk A.I., Osiptsov A.N.** Direct numerical simulation of energy separation effect in the near wake behind a circular cylinder // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018. V. 119. P. 665–677.
3. **Попович С.С.** Особенности автоматизации эксперимента и обработки результатов при исследовании теплообмена в сверхзвуковом потоке сжимаемого газа // Программная инженерия. 2018. № 1. С. 35–45.

S.S. Popovich [1], N.A. Kiselev [1], A.G. Zditovets [1]

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

EXPERIMENTAL STUDY OF THE LONGITUDINAL PRESSURE GRADIENT INFLUENCE ON THE ADIABATIC WALL TEMPERATURE DURING SUPERSONIC FLOW AROUND THE CYLINDER

УДК 621.9

С.А. Михайленко, М.А. Шеремет

Томский государственный университет, г. Томск, 634050, пр. Ленина, 36(•)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ В КУБИЧЕСКОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПОЛОСТИ С ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО ОБОГРЕВАЕМЫМИ СТЕНКАМИ

Задачи конвективного тепломассопереноса на сегодняшний день очень распространены и являются неотъемлемой частью различных производственных и технических процессов. Интересной областью исследований является теплообмен в условиях вращения [1, 2]. Вращающиеся системы можно встретить во многих инженерных задачах, таких как, проектирование роторных теплообменников, двигателей, систем охлаждения электронной аппаратуры, в задачах металлургии и многих других.

Настоящая работа посвящена численному исследованию конвективного теплообмена во вращающейся кубической полости с дифференциально обогреваемыми стенками. Исследуемый объем заполенен несжимаемой ньютоновской жидкостью Pr=0.7. В начальный момент времени левая стенка полости нагревается, правая стенка полости охлаждается, а на остальных стенках реализуются условия теплоизоляции. Полость вращается с постоянной угловой скоростью ξ_0 против хода стрелки часов вокруг оси, параллельной оси y и проходящей через центр области решения.

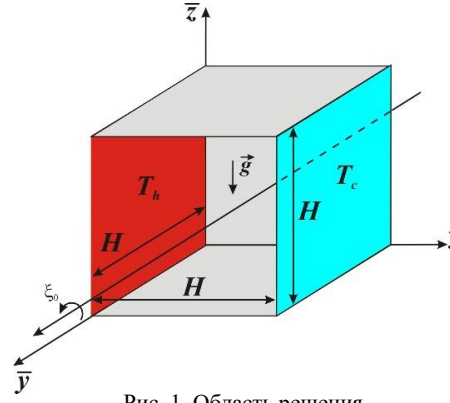


Рис. 1. Область решения

Определяющие уравнения течения ньютоновской несжимаемой жидкости, основанные на законах сохранения массы, импульса и энергии, сформулированы в переменных «векторный потенциал – вектор завихренности». Полученная система уравнений с соответствующими начальными и граничными условиями разрешена численно методом конечных разностей на равномерной сетке с использованием аппрок-

(•)С.А. Михайленко, stepanmihaylenko@gmail.com

симационных соотношений второго порядка точности. Разностные уравнения Пуассона для компонент векторного потенциала решены методом последовательной верхней релаксации, уравнения дисперсии компонент вектора завихренности и уравнение энергии решены на основе локально-одномерной схемы А.А. Самарского с последующим применением метода прогонки.

Моделирование режимов естественной конвекции в дифференциально-обогреваемой кубической вращающейся полости проведено в широком диапазоне изменения определяющих параметров. В результатах исследования отражены распределения изотерм и изолиний компонент векторного потенциала, а также проведено сравнение полученных данных с двумерной задачей [3]. Проведен анализ влияния чисел Рэлея и Тейлора на гидродинамику и теплоперенос в системе. Установлены оптимальные параметры для интенсификации теплообмена.

Работа выполнена в рамках реализации проекта Российского фонда фундаментальных исследований (соглашение № 20-31-90081).

Список литературы

1. **Sedelnikov G.A., Busse F.H., Lyubimov D.V.** Convection in a rotating cubical cavity // European Journal of Mechanics B/Fluids. – 2012. – Vol. 31. – Pp. 149–157.
2. **Jena S.K., Yettella V.K.R., Sandeep C.P.R., Mahapatra S.K., Chamkha A.J.** Three-dimensional Rayleigh–Benard convection of molten gallium in a rotating cuboid under the influence of a vertical magnetic field // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2014. – Vol. 78. – Pp. 341–353.
3. **Михайленко С.А., Шеремет М.А.** Моделирование конвективно-радиационного теплопереноса в дифференциально обогреваемой вращающейся полости // Компьютерные исследования и моделирование. – 2018. – Т. 10, № 2. – С. 195–207.

S.A. Mikhailenko, M.A. Sheremet

Tomsk State University, Russia, 634050, Tomsk, Lenin str., 36

NATURAL CONVECTION IN A ROTATING DIFFERENTIALLY HEATED CUBIC CAVITY

УДК 532:536.2

Е.В. Шулепова, М.А. Шеремет

Томский государственный университет, 634050, Томск, пр. Ленина, 36 (•)

СВОБОДНАЯ КОНВЕКЦИЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В ДВУСВЯЗНОЙ ОБЛАСТИ С ПЕРИОДИЧЕСКИ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ

В настоящее время, в связи с повышением производительности электронных систем, возникает проблема интенсификации теплоотвода от их составных элементов [1, 2]. Цель представленной работы – численный анализ свободно-конвективного теплопереноса в двусвязной полости с внутренним тепловыделяющим элементом, адиабатическими горизонтальными стенками и изотермическими вертикальными границами. Особенностью рассматриваемой постановки является наличие внутреннего источника периодического тепловыделения в зависимости от времени, не связанного с внешними границами полости, что требует детального изучения при использовании двухполевого метода [3] решения задач гидродинамики и теплопереноса.

Исследования проведены в рамках механики сплошной среды с использованием основных законов сохранения массы, импульса и энергии. Ньютоновская теплопроводная жидкость, удовлетворяющая приближению Буссинеска, циркулирует внутри двусвязной области вследствие влияния внутреннего тепловыделяющего элемента, изотермических вертикальных стенок и ориентации силы тяжести.

Математическая постановка задачи включает дифференциальные уравнения в частных производных Обербека–Буссинеска, описывающие гидродинамику и теплоперенос в рассматриваемой области решения, нестационарное уравнение теплопроводности с источниковым членом внутри тепловыделяющего элемента, а также начальные и граничные условия [4]. Краевая задача формулируется с использованием безразмерных преобразованных переменных «функция тока – завихренность». Решение краевой задачи проводится на основе метода конечных разностей.

Следует отметить, что при решении задач конвективного теплопереноса на основе двухполевого метода [3] возникают сложности с определением значения функции тока на поверхностях внутренних элементов. В настоящей работе для определения этого значения была разработана специальная процедура, основанная на однозначности поля давления вдоль внутренней поверхности блока [5].

(•) Е.В. Шулепова, elena.vasilevna.1996@mail.ru

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

Численные исследования проведены в широком диапазоне изменения определяющих параметров, характеризующих режимы конвективного теплопереноса: число Рэлея ($Ra = 10^4–10^6$), число Прандтля ($Pr = 6.82$), число Остроградского ($Os = 1–10$), частота внутреннего тепловыделения ($f = 0.01\pi–0.1\pi$). Исследования проводились для различных положений внутреннего тепловыделяющего элемента.

В результате моделирования получены распределения изолиний функции тока и температуры, отражающие внутреннюю гидродинамику и тепловое состояние объекта исследования. Отдельно проанализировано влияние отмеченных параметров на среднюю температуру источника энергии и установлены условия, позволяющие интенсифицировать теплоотвод.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-79-20141).

Список литературы

1. **Murshed S.M.S., Nieto de Castro C.A.** A critical review of traditional and emerging techniques and fluids for electronics cooling // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 78. P. 821–833.
2. **Bahiraei M., Heshmatian S.** Electronics cooling with nanofluids: A critical review // Energy Conversion and Management. 2018. Vol. 172. P. 438–456.
3. **Тарунин Е.Л.** Двухполевой метод решения задач гидродинамики вязкой жидкости. Пермь, 1985. 88 с.
4. **Sivaraj C., Miroshnichenko I.V., Sheremet M.A.** Influence of thermal radiation on thermogravitational convection in a tilted chamber having heat-producing solid body // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2020. Vol. 115. 104611.
5. **Pop I., Sheremet M.A., Grosan T.** Thermal convection of nanoliquid in a double-connected chamber // Nanomaterials. 2020. Vol. 10. No. 588.

E.V. Shulepova, M.A. Sheremet

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

FREE CONVECTION OF VISCOUS FLUID IN A DOUBLE-CONNECTED CAVITY WITH PERIODICALLY HEAT-GENERATING ELEMENT

УДК 621.039

Е.А. Белавина[1,2], *Н.Ю. Пятницкая*[1,2]

[1] Национальный исследовательский университет "МЭИ",
Москва, 111250, Красноказарменная улица, д. 14
[2] Объединенный институт высоких температур РАН,
125412, Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ В ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ЯЧЕЙКЕ С ВНУТРЕННИМИ ИСТОЧНИКАМИ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ

Одной из проблем на пути развития современной ядерной энергетики является ограниченность ресурсов уранового топлива. В долгосрочной перспективе технологии жидкосолевых ядерных реакторов (ЖСР) с циркулирующим топливом могут быть востребованы как для создания Th–U размножителя (ЖСР-Р), так и в качестве нового элемента в системе ядерной энергетики в симбиозе с твердотопливными реакторами для дожигания минорных актинидов из ОЯТ твёрдотопливных реакторов (ЖСР-С) [1-3]. В связи с этим, комплексное исследование, состоящее из изучения свойств перспективных расплавов фторидных солей, а также создание экспериментальной базы для верификации инженерных расчётов, представляют особый интерес для проектирования реакторных установок.

С другой стороны, в настоящее время, даже современными методами математического моделирование физических процессов, предсказать работу в нестандартных режимах крайне сложно. Работа в данной области ведется коллективом авторов НИУ «МЭИ»-ОИВТ РАН. На начальном этапе было проведено исследование уже существующий источников литературы с целью оценки и анализа имеющихся данных. Было выявлено, что данный вопрос является актуальным, а его изучение представляет интерес.

Далее было проведено экспериментально исследование свободной конвекции имитаторов расплава соли на примере водного раствора NaCl. Выбор данного теплоносителя был оправдан простотой и безопасностью его использования в эксперименте, в сочетании с требуемыми значениями электропроводности, теплопроводности и других физических свойств.

Серия испытаний проводилась в теплоизолированной прямоугольной ячейке с внутренним источникам тепла. Имитация объемного тепловыделения осуществляется за счет пропускания тока через раствор NaCl с помощью электродов различного типа. Также проведена оценка устойчивости смешанной конвекции под влиянием барического градиента, архимедовой силы и объемного тепловыделения. Для верифика-

ции полученных данных параллельно с экспериментальной сессией проводились поддерживающие расчеты в пакете Comsol Multiphysics.

Список литературы

1. Жидкосолевые ядерные реакторы / В. Л. Блинкин, В. М. Новиков.,. М.: Атомиздат, 1978, 1112 с.
2. Ядерные энергетические реакторы / Дементьев Б. А., М.: Энергоатомиздат, 1978 с. 124-128.
3 **Novikov У.М.** Molten salt reactor and molten salt carriers for industrial heat supply//In 4. P. 199-201.
4 **Seung D. Lee, Jong K. Lee, Kune Y. Suh.** Boundary Condition Dependent Natural Convection in a Rectangular Pool with Internal Heat Sources// Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting Busan, Korea, October 27-28, 2005.
5. **Yerkes K. L., Faghri A.** Mixed convection analysis in large baffled rectangular chambers with internal heat sources // International journal of heat and mass transfer. – 1992. – Т. 35. – №. 5. – С. 1209-1228.
6 **Tasaka Y. et al**. Experimental investigation of natural convection induced by internal heat generation // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2005. – Т. 14. – №. 1. – С. 021.

E.A. Belavina[1,2], *N.Yu. Pyatnitskaya*[1,2]

[1] National Research University "Moscow Power Engineering Institute",
Russia 111250 Moscow, Krasnokazarmennaya street, 14

[2] Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences (JIHT),
Russia, 125412, Moscow, Izhorskaya st. 13 Bd.2

INFLUENCE OF NATURAL CONVECTION IN A RECTANGULAR CELL WITH INTERNAL SOURCES OF HEAT GENERATION

УДК 621.039

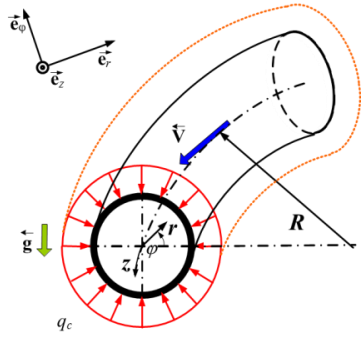
Е.А. Белавина[1,2], *Л.В. Ямщикова*[2], *Н.Г. Разуванов*[1,2]

[1] Национальный исследовательский университет "МЭИ",
Москва, 111250, Красноказарменная улица, дом 14
[2] Объединенный институт высоких температур РАН,
125412, Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ЗАКРУЧЕННОЙ ТРУБЕ В КОЛЬЦЕВОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ

Данная работа посвящена численному решению задачи гидродинамики и теплообмена в закрученной трубе в кольцевой системе координат. Обсуждаемый вопрос является актуальным, как с точки зрения теоретического обоснования, так с точки зрения практического применения. Рассматриваемая конфигурация каналов востребована в задачах теплообменного оборудования, а также в вопросе охлаждения ядерных реакторов на быстрых нейтронах [1-4].

Анализ литературы показал, что в большинстве источников (например, в [5-8]) предлагается переход от декартовой к спирально-винтовой системе координат при помощи преобразования координат. Данный подход является частным и несёт под собой сложные вычисления. Предложенная методика является более строгой и общей. В ней используется система дифференциальных уравнений, записанная в тензорном виде для обобщенной криволинейной системы координат, в которой выведены все члены, необходимые для расчета характеристик гидродинамики и теплообмена: давления, компонент вектора скорости и температуры, - в приближении к среде жидкого металла.



В работе исследуется неизотермическое течение жидкого металла в кольцевой трубе (Рис. 1). Снаружи трубы реализован однородный обогрев с постоянной плотностью теплового потока q_c, как по длине, так и по периметру сечения. Рассматривается поворот трубы в горизонтальной плоскости с радиусом R, так что вектор ускорения свободного падения g лежит в плоскости поперечного сечения трубы. Однако, задача численного моделирования течения в декартовой системе координат осложняется построением сетки.

Методика численного моделирования заключается совместном применении системы дифференциальных уравнений в цилиндрических координатах, которая реализована в большинстве расчетных кодах и добавочными членов, применимых в кольцевой системе в результате закрутки продольных осей координат. При этом геометрия расчетной области сохраняется, - это прямая круглая труба.

В соответствии с описанной методикой проведен расчет гидродинамики и теплообмена при течении жидкого металла в обогреваемом кольцевом канале, лежащим горизонтальной плоскости, в режимах смешанной турбулентной конвекции при разных значениях радиуса закрутки. Обнаружено и продемонстрировано сильное влияние закрутки потока на характеристики теплообмена

Список литературы

1. **Orlov V.V. et al.** Deterministic Safety of BREST Reactors // Proceedings of ICONE-11, 11th International Conference on Nuclear Engineering. Tokyo, Japan, 2003. – 9 p.
2. **Грабежная В.А. и др.** Расчетно-экспериментальное исследование работы модели парогенератора БРЕСТ-ОД-300 // Известия вузов, 2013. – № 1. – С. 101-109.
3. **Абрамов А.В.** Экспериментальное обоснование безопасности реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 при разгерметизации теплообменных труб // Труды МНТК НИКИЭТ-2014, Москва, 2014 г. – 12 с.
4. **Васильев С.В., Кузьминов Ю.В.** Парогенератор РУ БРЕСТ-ОД-300 // Труды конф. «Проектное направление «Прорыв», Москва, 2015 г. – 18 с.
5. **Surattana Sungnul**. Transformation of the Navier-Stokes Equations in Curvilinear Coordinate Systems with Maple//Global Journal of Pure and Applied Mathematics. ISSN 0973-1768 Volume 12, Number 4 (2016), pp. 3315–3325.
6. Векторный анализ и начала тензорного исчисления. А. И. Борисенко, И.Е. Тарапов – М.: Высшая школа, -1966, – 252 с.
7. Vectors and Tensors in Engineering and Physics. D.A. Danielson. Addison-Wesley Publishing Company, 280, 1992.
8. **Токарев Ю.Н.** Уравнения теплообмена закрученных потоков в полярно-спиральных координатах // Вестник МЭИ. – 2004. – № 5. – С. 115-117.

E.A. Belavina[1,2]*, L.V. Yamshchikova*[2]*, N.G. Razuvanov*[1,2]

[1] National Research University "Moscow Power Engineering Institute",
Russia 111250 Moscow, Krasnokazarmennaya street, 14

[2] Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences (JIHT),
Russia, 125412, Moscow, Izhorskaya st. 13 Bd.2

SOLUTION OF A PROBLEM OF CONVECTIVE HEAT TRANSFER IN A SWIRL PIPE IN A HELICAL COORDINATE SYSTEM

УДК 532.542.4

К.Б. Минко[1], *В.И. Артемов*[1], *М.В. Макаров*[1], *Г.Г. Яньков*[1]

[1]Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ТВЕРДОЙ СТЕНКИ НА ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ ЖИДКОСТИ В КРУГЛОЙ ТРУБЕ

Введение. В настоящей работе с помощью гибридного метода моделирования больших вихрей (RANS/LES) исследуются температурные пульсации в жидкости и стенке трубы в сопряженной постановке. Расчеты турбулентного течения выполнены для воды с использованием реализованной в авторском CFD коде ANES [1] «сопряженной» модели LES.

Методология. Рассматривалось турбулентное течение жидкости в горизонтальной круглой трубе на стабилизированном участке при равномерном обогреве стенки. Тепловой поток на внутренней поверхности стенки моделировался двумя способами: с помощью заданной постоянной плотности теплового потока на внешней поверхности трубы (вариант «Wq_w»), либо–путем задания объемного тепловыделения в стенке трубы (вариант «Wq_v»). Исследовалась зависимость пульсаций температуры в пристеночной области и самой стенке от толщины и материала стенки.

Верификация сопряженной модели проведена для турбулентного течения воды в круглой трубе при параметрах Pr=6,2 и Re=7500; результаты по температурным пульсациям сравнивались с экспериментальными данными [2]. Стенка трубы в экспериментах [2] толщиной 0,49 мм была выполнена из стали и относится к категории «тонкой» и «слаботеплопроводной». Получено хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных в пристеночной зоне [3]. Отличия в пульсациях температуры на внутренней поверхности стенки в вариантах «Wq_w» и «Wq_v» оказались несущественными.

Значение интенсивности пульсаций температуры на внутренней поверхности стенки канала (и внутри стенки) зависят от трех параметров [4]: числа Прандтля жидкости Pr, безразмерной толщины стенки δ_w^{++} и параметра отношения термических активностей жидкости и стенки *K*.

$$\delta_w^{++} = u_\tau \delta_w \nu_f^{-1} a_f^{1/2} a_s^{-1/2}, \quad a = \lambda \left(\rho c_p\right)^{-1}, \quad K = \left(\rho c_p \lambda\right)_f^{1/2} \left(\rho c_p \lambda\right)_s^{-1/2},$$

где u_τ – динамическая скорость; δ_w – толщина стенки; ν – кинематическая вязкость; λ – теплопроводность; c_p – изобарная теплоемкость; ρ – плотность; индексы: f – жидкость, s – стенка.

Результаты расчетов. Проведены расчеты течения воды (Pr=7, Re=7500) в трубах с 4-мя различными толщинами стенки. Использовалось два материала стенки, свойства которых соответствуют K=0,1 и 0,5.

Расчеты выполнены с использованием неструктурных сеток и схем второго порядка точности по времени и пространству. Общее число ячеек составило 1,86 млн. для варианта без стенки и от 2,47 до 4,27 млн. для вариантов с твердой стенкой.

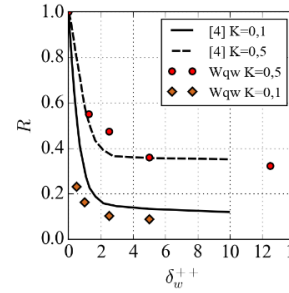


Рис. 1. Зависимость параметра R от безразмерной толщины стенки для Pr=7 и K=0,1 и 0,5.

На рис. 1 представлена зависимость от безразмерной толщины стенки параметра R, равного отношению интенсивности температурных пульсаций на внутренней поверхности трубы при наличии стенки к такому же значению при задании постоянной плотности теплового потока на внутренней поверхности трубы. Результаты сравниваются с данными работы [4] для плоского канала, в которой нестационарное поле скорости задавалось приближенно. Следует отметить хорошую согласованность сопоставляемых на рис. 1 результатов и полученных закономерностей.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-08-00683-а).

Список литературы

1. Код ANES [Электронный ресурс]. URL: http://anes.ch12655.tmweb.ru/.
2. **Сукомел Л.А.** Разработка метода и результаты экспериментального исследования теплоотдачи и температурных полей при течении воды в трубе // Дисс. на соискание ученой степени на звание к.т.н., Москва МЭИ. 1984.
3. **Artemov V.I. , Makarov M.V., Minko K.B. and Yankov G.G.** 2020. Numerical solution of the conjugate heat transfer problem for turbulent liquid flow in a tube using the large eddy simulation method. J. Phys.: Conf. Ser. 1683 022095.
4. **Kasagi N., Kuroda A. and Hirata M.**, Numerical investigation of near-wall turbulent heat transfer taking into account the unsteady heat conduction in the solid wall // Int. J. Heat Mass Transf.1989, Vol. 111 pp. 385-392.

K.B. Minko[1], *V.I. Artemov*[1], *M.V. Makarov*[1], *G.G. Yankov*[1]

[1] National Research University "MPEI",
Russia, 111250 Moscow, Krasnokazarmennaya, 14

EFFECT OF A SOLID WALL PROPERTIES ON TEMPERATURE FLUCTUATION FOR THE TURBULENT LIQUID FLOW IN A CIRCULAR PIPE

УДК 533

О.А. Евдокимов, А.И. Гурьянов, С.В. Веретенников

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

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ОГРАНИЧЕННОГО ПРОТИВОТОЧНОГО ЗАКРУЧЕННОГО ТЕЧЕНИЯ

Создание новейшей техники и перспективных промышленных технологий, основанных на протекании процессов горения в закрученных и противоточных течениях, требует фундаментальных знаний об их нестационарной структуре и подходах к управлению. На структуру турбулентного потока в камере вихревых горелочных устройств значительно влияют особенности радиального распределения осреднённых параметров и кривизна обтекаемой газом поверхности. При этом поле турбулентных пульсаций закрученного ограниченного потока всегда трёхмерное и имеет особенности, отличающие его от турбулентных характеристик незакрученных течений.

Закрутка потока в камере сгорания вихревой горелки оказывает влияние не только на газодинамическую картину течения, но и определяет интенсивность протекания тепломассообменных процессов и химических реакций. Исследования [1–3] показывают, что существует возможность повышения эффективности процесса и теплонапряжённости зоны горения за счёт закрутки. Это связано с организацией в закрученном потоке периферийного и приосевого течений таким образом, что эволюция в ограниченном канале свободного потенциального вихря, позволяет естественным образом организовать надёжное конвективное охлаждение стенки камеры сгорания, как со стороны охлаждающего воздуха, так и со стороны продуктов сгорания.

В работе предложен комплексный метод исследования структуры течения в противоточной вихревой камере (ПВК), основанный на численном моделировании гибридным вихреразрешающим методом DES, а также с использованием анизотропных и двупараметрических моделей турбулентности в рамках подхода RANS. Экспериментальное исследование структуры течения выполнено методом PIV. Фотография экспериментальной модели с однозаходным сопловым вводом показана на рис. 1. Поле скорости в поперечном сечении ПВК показан на рис. 2.

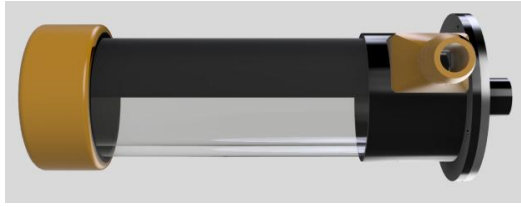


Рис. 1 Экспериментальная модель ПВК

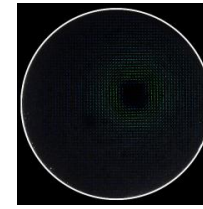


Рис. 2 Поле скорости в поперечном сечении ПВК

Также в работе выполнено сопоставление результатов расчета в DES и RANS постановках с данными [4] для вихревой камеры с восьмизаходным сопловым вводом. Полученные результаты позволили поставить вопрос об организации управления структурой течения в ПВК с целью снижения уровня турбулентных пульсаций и повышения точности прогнозирования методами численного моделирования. Многолетний опыт работы показывает, что наибольшую эффективность дает реализация геометрического фактора, выраженная в профилировании сечения соплового ввода, а также зоны разворота периферийного потока и формирования противоточного течения.

Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение фундаментальных научных исследований на 2020 год и плановый период 2021 и 2022 годов (шифр научной темы 0774-2020-0004).

Список литературы

1. **Evdokimov O.A. et al.** Experimental investigation of burning of pulverized peat in a bidirectional vortex combustor // Thermal Science and Engineering Progress. 2020. Vol. 18. P. 100565.
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. 2020. P. er.6178.
3. **Guryanov A.I. et al.** Counter-current hydrogen–oxygen vortex combustion chamber. Thermal physics of processing // Journal of the Energy Institute. 2020. Vol. 93, № 2. P. 634–641.
4. **Anderson M., Rom C., Chiaverini M.** Cold Flow Analysis of a Vortex Chamber Engine for Gelled Propellant Combustor Applications // 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Fort Lauderdale, Florida: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004.

O.A. Evdokimov, A.I. Guryanov, S.V. Veretennikov

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

A STUDY OF THE STRUCTURE OF CONFINED BIDIRECTIONAL SWIRLING FLOW

УДК 532.526

В.Г. Лущик, М.С. Макарова

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

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ С ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМ ГРАДИЕНТОМ ДАВЛЕНИЯ

Турбулентные пограничные слои, развивающиеся в присутствии положительного градиента давления (ПГД) имеют место во многих прикладных задачах, например, при обтекании затупленных тел, в диффузорах и в ряде других. Существенным барьером для прогресса в понимании влияния градиента давления на пограничные слои является большое пространство параметров и неопределенность в отношении важности каждого из них. В [1] перечислены некоторые параметры, оказывающие влияние на характеристики потоков с ПГД:

1. Предложенный Клаузером параметр градиента давления $\beta = (\delta^* \cdot dP/dx)/\tau_w$, где δ^* – толщина вытеснения, P – статическое давление, x – координата в направлении потока, τ_w - напряжение сдвига на стенке.

2. Число Рейнольдса трения $\mathrm{Re}_\tau = \delta \cdot u^*/\nu$, где δ – толщина пограничного слоя, $u^* = \sqrt{\tau_w/\rho}$ – скорость трения, ρ – плотность, а ν – кинематическая вязкость газа.

3. Параметр ускорения (торможения) $K = (\nu \cdot dU_1/dx)/U_1^2$, где U_1 – локальная скорость набегающего потока.

Целью настоящей работы является численное исследование турбулентного пограничного слоя с ПГД как для умеренного градиента давления, экспериментально исследованного в [1], так и для увеличенного, вплоть до предотрывного, градиента давления с расширением диапазона определяющих параметров β, K, Re_τ. В расчетах была использована трёхпараметрическая дифференциальная модель сдвиговой турбулентности [3].

Проведено сравнение результатов численного исследования влияния параметров ускорения (торможения) потока K и градиента давления β на профили скорости и интенсивности турбулентности в пограничном слое с умеренным положительным градиентом давления с известными экспериментальными данными. Показано, что влияние положительного градиента давления как в расчете, так и в эксперименте существенно в основной части пограничного слоя и слабое в присте-

(*) М.С. Макарова, mariia.makarova@gmail.com

ночной области. Получена расчетная зависимость относительной величины коэффициента трения C_f/C_{f0} от параметра градиента давления β для ряда значений параметра K, которая свидетельствует о возможности обобщения полученных результатов по параметру β.

При сильном градиенте давления в предотрывной области профиль скорости становится менее заполненным, приближаясь к линейному, коэффициент трения уменьшается, а энергия турбулентности и турбулентное напряжение сдвига существенно возрастают по сравнению со случаем безградиентного течения. Результаты численного исследования согласуются с известными экспериментальными данными.

Для градиентного течения в широком диапазоне параметра ускорения получена экспериментально подтвержденная расчетная зависимость для закона дефекта скорости, в котором вместо динамической скорости используется некоторая характерная скорость, содержащая величину градиента давления. Результаты расчета коэффициента трения в широком диапазоне параметра ускорения обобщаются зависимостью относительной величины коэффициента трения C_f/C_{f0} от параметра отрыва пограничного слоя $K\cdot\mathrm{Re}^{**}$, где $\mathrm{Re}^{**} = \delta^{**}\cdot U_1/\nu$ – число Рейнольдса, определенное по толщине потери импульса δ^{**}.

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

Список литературы

1. **Monty J.P., Harun Z., Marusic I.** A parametric study of adverse gradient turbulent boundary layers // Int. Journal of Heat and Fluid Flow. 2011. Vol. 32. P. 575-585.
2. **Clauser F.H.** Turbulent Boundary Layers in Adverse Pressure Gradients // Journal of the Aeronautical Sciences. 1954. Vol. 21. P. 91-108.
3. **Лущик В.Г., Макарова М.С., Решмин А.И.** Применение трехпараметрической дифференциальной модели турбулентности для решения задач течения и теплообмена в каналах переменного сечения: Часть 1 // Программная инженерия. 2021. Т. 12, № 1. С. 21–30.

V.G. Lushchik, M.S. Makarova

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

NUMERIVAL CTUDY OF TURBULENT BOUNDARY LAYER WITH ADVERSE PRESSURE GRADIENT

УДК 532.526.3

В.Г. Лущик, М.С. Макарова, А.И. Решмин

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

ТЕПЛООБМЕННИК «ТРУБА В ТРУБЕ» С ДИФФУЗОРНЫМИ КАНАЛАМИ

Теплообменники «труба в трубе», как отмечено в [1], - одни из самых простых и используемых в химической, пищевой, газовой промышленности в широком диапазоне температур и давлений. Повышение эффективности теплообменных аппаратов за счет интенсификации процессов теплообмена является актуальной задачей энергосбережения. К настоящему времени предложено большое количество разнообразных способов интенсификации теплообмена, обзору и анализу которых посвящена обширная литература. В недавней работе [2] представлен обзор работ по таким методам улучшения теплоотдачи в теплообменниках «труба в трубе». как шероховатость поверхности, различные вставки (ребра, спирали и т.п.) в каналы, добавки в теплоносители, а также внешние колебания или электромагнитное поле. Эти методы повышают теплоотдачу, но при этом растут потери давления на прокачку теплоносителя.

В предыдущей работе авторов [3], посвященной численному моделированию теплообмена в пластинчатых теплообменниках с диффузорными каналами, показано, что использование диффузорных каналов позволяет интенсифицировать теплообмен, в результате чего количество переданного тепла от «горячего» теплоносителя к «холодному» возрастает по сравнению с теплообменниками с каналами постоянного сечения.

Целью настоящей работы является рассмотрение возможности интенсификации теплообмена в теплообменниках «труба в трубе». Предлагаемое использование в этих теплообменниках, как и в пластинчатых теплообменниках [3], диффузорных каналов с гладкой поверхностью, обеспечивающей минимальные гидравлические потери, позволит обеспечить интенсификацию теплообмена практически без роста коэффициента трения. Это характеризует принципиальное отличие рассмотренного способа интенсификации теплообмена от других известных способов, где увеличение теплоотдачи достигается ценой значительного роста гидравлических потерь.

С использованием трехпараметрической дифференциальной модели турбулентности, дополненной уравнением переноса для турбулентного потока тепла проведено численное моделирование теплообмена в про-

(*) В.Г. Лущик, vgl_41@mail.ru

тивоточных теплообменниках «труба в трубе» с диффузорными каналами с малыми углами расширения.

Показано, что число Нуссельта и коэффициент теплоотдачи практически на всей длине в теплообменнике с диффузорными каналами превосходят соответствующие величины для теплообменника с каналами постоянного сечения. Полученные в расчетах величины интенсивности турбулентности и напряжения сдвига существенно возрастают в диффузоре, что приводит к интенсификации теплообмена в теплообменнике с диффузорными каналами. За счет интенсификации теплообмена мощность теплопередачи от «горячего» теплоносителя к «холодному» существенно возрастает по сравнению с теплообменниками с каналами постоянного сечения. Так, например, для угла расширения диффузоров 4° это возрастание может составлять 48%. Следствием этого является увеличение разности температур в «горячем» потоке на входе и выходе из теплообменника с диффузорными каналами по сравнению с теплообменником с каналами постоянного сечения.

Потери статического давления в диффузорных каналах теплообменника при малых углах расширения меньше потерь статического давления в каналах постоянного сечения при одинаковой длине и одинаковых числах Рейнольдса.

Работа выполнена в рамках исследований, финансируемых гос. бюджетом (АААА-А16-116021110203-6; АААА-А19-119012990110-0).

Список литературы

1. Справочник по теплообменникам в 2-х томах. Перевод с англ. М.: Энергоатомиздат. 1987.
2. **W. Wang at all** Optimal design of a double pipe heat exchanger based on the outward helically corrugated tube // Int. J. Heat Mass Trans. 135 (2019) 706-716.
3. **Лущик В.Г., Макарова М.С., Решмин А.И.** Пластинчатый теплообменник с диффузорными каналами // ТВТ. 2020. Т.58. № 3. С. 376–383.

V.G. Lushchik, M.S. Makarova, A.I. Reshmin

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

THE DOUBLE PIPE HEAT EXCHANGER WITH DIFFUSER CHANNELS

СЕКЦИЯ 2

Метастабильные состояния и флуктуационные явления

УДК 536.423

В.П. Коверда, В.Н. Скоков

Институт теплофизики УрО РАН,
Екатеринбург, 620016, ул. Амундсена, 107а(•)

СЛУЧАЙНЫЙ ПРОЦЕСС С ТУРБУЛЕНТНЫМ СПЕКТРОМ МОЩНОСТИ

Масштабно-инвариантные процессы с большими флуктуациями широко распространены в природе. Такие процессы характеризуются степенными зависимостями спектральной плотности и амплитудных распределений. Известным примером масштабно инвариантного процесса является колмогоровская турбулентность, когда при течении жидкости появляются пульсации различных масштабов, подчиняющиеся универсальным законам подобия. Но не все случайные процессы со степенным поведением спектральной плотности и амплитудных распределений можно свести к турбулентности. В критических режимах тепломассопереноса с фазовыми переходами могут возникать флуктуации со спектром мощности, обратно пропорциональным частоте ($1/f$ спектром). Экстремальные флуктуации в критических режимах тепломассопереноса моделируются системой двух нелинейных стохастических уравнений, описывающей взаимодействие флуктуаций вблизи критического перехода. Решением этой системы являются эволюция флуктуаций, часть которых подчиняется классической статистике: имеет экспоненциальную релаксацию и гауссовский «хвост» распределения амплитуд, а другая часть флуктуаций имеет степенную релаксацию и степенной «хвост» распределения. Исследование взаимодействия больших и малых флуктуаций в критической области объясняет физическую природу $1/f$ шума и открывает новые возможности исследования больших флуктуаций со степенным распределением амплитуд и их взаимодействия с классическими флуктуациями. В настоящей работе показано, что в системе уравнений, моделирующей флуктуации при взаимодействующих фазовых переходах, наряду с критическим состоянием с $1/f$ спектром, существует критический переход, характеризующийся турбулентным спектром мощности $S \sim f^{-5/3}$. Система уравнений в этом случае имеет вид:

$$\frac{d\varphi}{dt} = -\varphi\psi^2 + \psi + \xi(t),$$

$$\frac{d\psi}{dt} = -\psi\varphi^2 + 2\varphi,$$

(•) koverda@itp.uran.ru

где φ и ψ – динамические переменные (параметры порядка), ξ – гауссовский δ-коррелированный шум с амплитудой σ, который подается только в первое уравнение системы.

При критической интенсивности белого шума спектр мощности переменной φ принимает вид: $S \sim f^{-5/3}$, характерный для колмогоровской турбулентности.

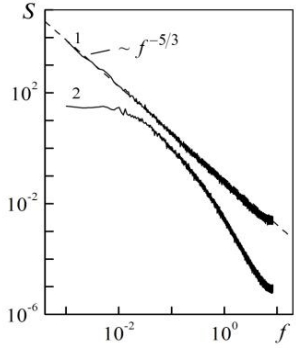


Рис.1. Спектры мощности переменных φ (1) и ψ (2). Амплитуда шум $\sigma = 1.5$.

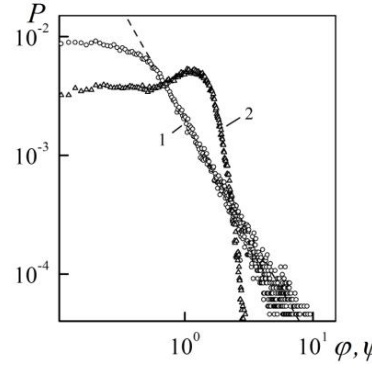


Рис.2. Плотности вероятности амплитудных распределений переменных φ (1) и ψ (2). Амплитуда шума $\sigma = 1.5$. Штриховая линия – зависимость $P(\varphi) \sim \varphi^{-2}$.

На рис.1 приведены спектры мощности переменных φ (1) и ψ (2). На рис.2 в логарифмических координатах приведены плотности вероятности амплитудных распределений переменных φ (1) и ψ (2). Из рис.2 видно, что переменная φ с турбулентным спектром имеет степенное распределение амплитуд. Показано, что критическому процессу соответствует максимум информационной энтропии, что свидетельствует о его устойчивости.

Таким образом, при взаимодействующих фазовых переходах с развитыми флуктуациями наряду с $1/f$ флуктуациями, возможны случайные процессы с турбулентным спектром мощности: $S \sim f^{-5/3}$.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 19-08-00091-а.

V.P. Koverda, V.N. Skokov

Institute of Thermal Physics, Ural Branch of the RAS,
Russia, 620016, Ekaterinburg, Amundsen Str., 107a

RANDOM PROCESS WITH A TURBULENT POWER SPECTRUM

УДК 536.423

А.В. Решетников, Л.Э. Мартынова, М.Е. Игнатюк, В.Н. Скоков, В.П. Коверда

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

ЛОКАЛЬНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ФЛУКТУАЦИЙ НА ПРОВОЛОЧНОМ НАГРЕВАТЕЛЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ КИПЕНИЯ

В кризисных режимах тепломассопереноса с фазовыми переходами могут возникать высокоинтенсивные низкочастотные пульсации со спектром мощности обратно пропорциональным частоте - $1/f$ – флуктуации [1, 2]. В частности, они обнаружены при переходе от пузырькового режима кипения к пленочному на проволочном нагревателе, в колебательных режимах горения, в струе вскипающей жидкости и других системах [3]. В большинстве случаев проводились измерения флуктуаций интегральных параметров. Вместе с тем представляет интерес изучение локальных флуктуационных процессов, что, возможно, позволит выявить источники $1/f$ флуктуаций.

Проведено экспериментальное исследование локальных пульсационных процессов на платиновом проволочном нагревателе, погруженном в воду, в условиях пузырькового и пленочного режима кипения методом лазерной фотометрии. Найдено, что при интенсивном пузырьковом кипении на горизонтальном и вертикальном нагревателе спектры мощности локальных пульсаций имели низкочастотную зависимость обратно пропорциональную частоте ($1/f$ –флуктуации). Точечное зондирование парового конуса около вертикального нагревателя при пленочном режиме кипения показали, что у вершины конуса флуктуации паровой пленки имели лоренцевские спектры (постоянное значение спектральной плотности в области низких частот). В тоже время измерения флуктуаций в основании парового конуса, где интегрируются пульсации всей паровой пленки, выявили наличие $1/f$– зависимости в низкочастотной области. Функции распределения амплитуд колебаний при этом имели степенную зависимость для больших значений амплитуд и гауссовское распределение для малых отклонений от среднего значения. Для горизонтального нагревателя локальные пульсации паровой пленки имели характер лоренцевских спектров. Также в опытах проведены одновременные измерения интегральных флуктуаций проволочного зонда резистивным методом и локальных флуктуационных характеристик фотометрическим методом. Найдены корреляции между локальными и интегральными флуктуационными процессами на проволочном нагревателе при различных режимах кипения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 19-08-00091-а).

Список литературы

1. **Коверда В. П.**, **Скоков В. Н.**, **Скрипов В. П.**, 1/*f* – при неравновесном фазовом переходе. Эксперимент и математическая модель. // ЖЭТФ. 1998. Т. 113, вып. 5. С. 1748 – 1757.
2. **Koverda V.P.**, **Skokov V.N.**, The origin of 1/*f* fluctuations and scale transformations of time series at nonequilibrium phase transitions, Physica A 346 (3 – 4) (2005). P. 203 – 216.
3. **Skokov V. N.**, **Koverda V. P.**, **Reshetnikov A. V.**, **SkripovV. P.**, **Mazheiko N. A.**, **and Vinogradov A. V.** 1/*f*-noise and self-organized criticality in crisis regimes of heat and mass transfer// International Journal of Heat and Mass Transfer. May 2003. V. 46. N. 10. P. 1879-1883

A.V. Reshetnikov, L.E. Martynova, M.E. Ignatyuk, V.N. Skokov, V.P Koverda

Institute of Thermal Physics UB RAS,
Russia, 620016 Yekaterinburg, Amundsena, 107A

LOCAL SOUNDING OF FLUCTUATIONS ON A WIRE HEATER UNDER DIFFERENT BOILING MODES

УДК 536.423

В.Е. Виноградов, П.А. Павлов

Институт теплофизики УрО РАН,
620090, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 107а

ПРЕДЕЛЬНЫЙ ПЕРЕГРЕВ ВОДНОГО РАСТВОРА ГИДРОКСИДА КАЛИЯ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЭЛЕКТРОЛИЗЕ

Импульсный электролиз используется в технике как для интенсификации процессов осаждения гальванических покрытий, так и для получения газообразного водорода и кислорода [1]. При быстром включении тока через электролит на поверхности электродов создается раствор, пересыщенный газовой компонентой. До начала выделения газа из жидкости раствор находится в метастабильном состоянии. Затем происходит взрывное газовыделение.

В данной работе экспериментально исследовано влияние импульсного электролиза на предельный перегрев жидкости на аноде. С этой целью разработана и апробирована методика насыщения жидкости газообразными продуктами электролиза. Жидкость насыщалась газом на поверхности анода при одновременном его нагреве импульсами тока длительностью 20 мкс и созданием разности потенциалов между анодом и катодом до 80 вольт в течение 15-25 мкс. В качестве анода использовалась платиновая проволочка диаметром 20 мкм и длиной 8 мм. Температура проволочки задавалась греющими импульсами прямоугольной формы длительностью 15-25 мкс. Момент вскипания и температура предельного перегрева определялись по известной методике [2]. Катодом служила пластина из нержавеющей стали шириной 6 мм. Расстояние между электродами составляло ~3 мм. Плотность тока на аноде достигала в опытах 10^6 А/м^2. Электроды помещались в ячейку из фторопласта объемом ~10 см^3 (рис. 1).

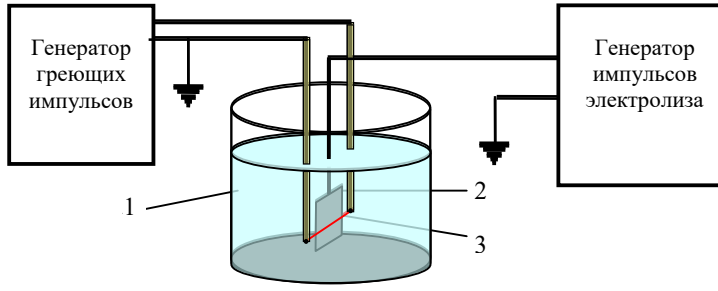


Рис.1. Измерительная ячейка: 1 — корпус ячейки; 2 — катод; 3 — анод.

Проведены опыты с 1.5% раствором KOH в воде. В результате электролиза жидкость на аноде насыщалась кислородом, что активировало вскипание электролита на аноде. Получена зависимость температуры предельного перегрева раствора от плотности тока (рис. 2). Мольная концентрация кислорода в жидкости на поверхности проволочки в опытах менялась от 0 до 0.16%.

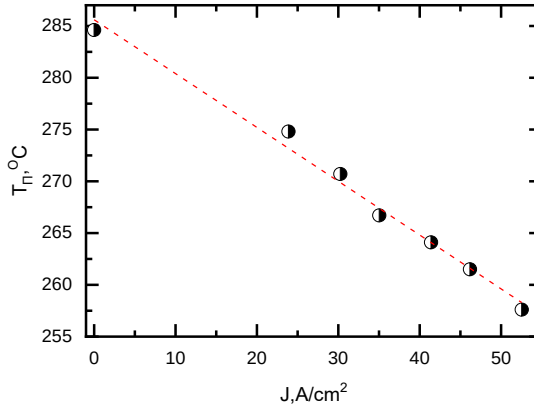


Рис.2. Зависимость температуры предельного перегрева электролита от плотности тока на аноде

Список литературы

1. Импульсный электролиз / Н.А. Костин, В.С. Кубановский, А.В Заблудовский. Отв. Ред. А.В.Городынский. Киев: Наук. думка, 1989. 168 с.
2. **Павлов П.А**. Динамика вскипания сильно перегретых жидкостей. Свердловск: УрО АН СССР, 1988. 244 с.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-08-00270).

V.E. Vinogradov, P.A. Pavlov

Institute of Thermophysics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
620090, Russia, Yekaterinburg, st. Amundsen, 107a

SUPERHEAT LIMIT OF AQUEOUS SOLUTION OF POTASSIUM HYDROXIDE AT PULSE ELECTROLYSIS

УДК 536+62-63

Е.Д. Никитин, А.П. Попов, Н.С. Богатищева, М.З. Файзуллин

Институт теплофизики УрО РАН,
Екатеринбург, 620016, Амундсена, 107а

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОНЕНТОВ БИОТОПЛИВ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ

Глобальное потепление и грядущее исчерпание запасов нефти делают актуальной проблему поиска альтернативных возобновляемых источников энергии. Один из путей решения указанной проблемы – использование жидких (моторных) биотоплив второго поколения. В отличие от биотоплив первого поколения (этанол, биодизель) биотоплива второго поколения производятся из непищевых частей растений. Сведения о теплофизических свойствах соединений, вовлеченных в производство биотоплив, необходимы для разработки технологий производства биотоплива и для расчета процессов его горения в двигателях внутреннего сгорания.

В докладе представлены результаты измерений критической температуры T_c, критического давления p_c, молярной теплоемкости $C_{p,m}$ и температуропроводности a. Объектами исследований служили собственно компоненты биотоплив (2-метилфуран, 2,5-диметилфуран, 2-метилтетрагидрофуран, метил, этил, бутил, пентил пентаноаты, метил, этил, пропил, бутил левулинаты) и промежуточные продукты (гамма-валеролактон, левулиновая кислота). Образцы веществ были куплены у фирмы Sigma-Aldrich и имели чистоту не менее 98 мол. %.

Измерения критических свойств выполнены методом импульсного нагрева, который был разработан авторами доклада; методу присвоена категория “методика ГСССД” [1]. Метод импульсного нагрева позволяет измерить критическую температуру и критическое давление термонестабильных соединений, к которым относятся многие компоненты биотоплив второго поколения. Теплоемкость и температуропроводность измерены с помощью дифференциального сканирующего калориметра DSC 204 F1 Phoenix (Netzsch) и прибора LFA 457 MicroFlash (Netzsch), реализующего метод лазерной вспышки. Относительные расширенные неопределенности при доверительной вероятности 0.95 составляют: $U_r\left(T_c\right)=0.01$, $U_r\left(p_c\right)=0.03$, $U_r\left(C_{p,m}\right)=0.02$ и $U_r\left(a\right)=0.05$.

Измерения теплоемкости и температуропроводности проведены при атмосферном давлении в интервале температуры от комнатной до температуры начала интенсивного испарения исследуемого вещества.

Получены уравнения, описывающие зависимость теплоемкости и температуропроводности от температуры.

Теплофизические свойства веществ, измеренные в настоящей работе, сравнивались с результатами расчетов. Методы Вилсона-Джасперсона, Константину-Гани, Марреро-Гани и Хуккерикара и др. [2,3] были использованы для оценки критических свойств. Теплоемкость рассчитывалась методами Дворкина и др. [4] и Колска и др. [5]. Теплопроводность, необходимая для оценки температуропроводности, рассчитывалась методами Латини и др. и Састри и др. [2].

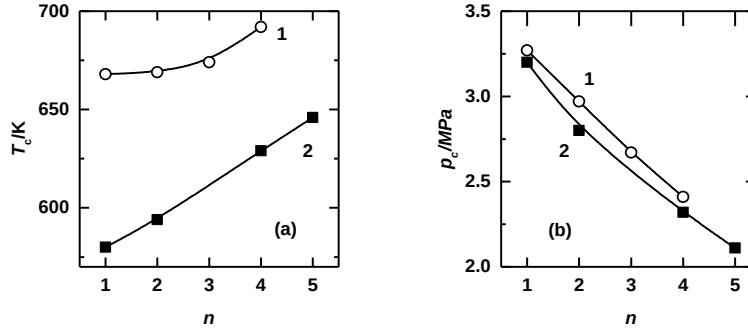


Рис. 1. Критическая температура (a) и критическое давление (b) алкил левулинатов $C_5H_7O_3(CH_2)_nH$ (1) и алкил пентаноатов $C_5H_9O_2(CH_2)_nH$ (2).

Список литературы

1. **Е.Д. Никитин, П.А. Павлов.** Метод ГСССД 163-2010. Деп. рук. № 865а-2010 кк. М.: ФГУП «Стандартинформ», 2010.
2. **B.E. Poling, J.M. Prausnitz, J.P. O'Connell**, The Properties of Gases and Liquids. New York: McGraw-Hill, 2000.
3. **A.S. Hukkerikar, B. Sarup, A.T. Kate, J. Abildskov, G. Sin, R. Gani** // Fluid Phase Equilib. 2012. Vol. 521. P. 25–43.
4. **P.L. Dvorkin, G.L. Ryzhova, Yu.A. Lebedev** // Bull. Acad. Sci. USSR, Div. Chem. Sci. 1984. Vol. 33. P. 982–987.
5. **Z. Kolska, J. Kukal, M. Zábranský, V. Růžička** // Ind. Eng. Chem. Res. 2008. Vol. 47. P. 2075–2085.

E.D. Nikitin, A.P. Popov, N.S. Bogatishcheva, M.Z. Faizullin

Institute of Thermal Physics, UrB of RAS,
Russia 620016 Ekaterinburg, Amundsen Str., 107A

THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF SECOND GENERATION BIOFUEL COMPONENTS

УДК 536.4.033

С.П. Проценко, В.М. Брюханов, В.Г. Байдаков

Институт теплофизики УрО РАН, 620016, Екатеринбург, Амундсена, 107а [•]

ВСКИПАНИЕ РАСТЯНУТОЙ ЛЕННАРД-ДЖОНСОВСКОЙ ЖИДКОСТИ В КАНАЛЕ С ТВЕРДЫМИ ГЛАДКИМИ СТЕНКАМИ

Вскипание жидкости обычно происходит в местах ее контакта с твердой поверхностью, где присутствуют дефекты в виде полостей, заполненных нерастворенным газом, и отдельные плохо смачиваемые жидкостью участки. Это понижает работу образования критического зародыша и инициирует гетерогенный механизм зарождения паровой фазы. Несмотря на преобладание при кипении жидкости гетерогенного зародышеобразования физические механизмы зарождения пузырьков в присутствии поверхностей до сих пор полностью не установлены, что мешает надежному прогнозированию скорости нуклеации и достижимых перегревов жидкости.

Наиболее простой случай гетерогенного зародышеобразования – зарождение пузырька в жидкости, контактирующей с твердой гладкой стенкой. Обычно предполагается, что пузырек пара образуется непосредственно на поверхности стенки. В данной работе методом молекулярной динамики (МД) исследуются механизм и кинетика нуклеации пузырьков в растянутой (перегретой) леннард-джонсовской (ЛД) жидкости, находящейся между двумя плоскими гладкими твердыми стенками. МД моделирование проведено при температуре $T = 0.7$ (в единицах ε_{11}/k_B, где ε_{11} – параметр потенциала взаимодействия частиц жидкости, k_B – постоянная Больцмана), близкой к температуре тройной точки жидкости, при различных значениях параметра смачивания стенки $\varepsilon_{12}/\varepsilon_{11}$, где ε_{12} – параметр потенциала взаимодействия частиц жидкости и стенки.

В пристеночном слое толщиной до $6\sigma_{11}$, где σ_{11} – диаметр молекулы жидкости, распределение плотности жидкости представляется затухающей осциллирующей функцией (см. Рис. 1). На расстоянии от стенок больше $6\sigma_{11}$ плотность жидкости становится постоянной. Визуализацией процесса вскипания установлено, что в момент зарождения пузырька плотный мономолекулярный слой жидкости сохранялся на поверхности стенки. Функция распределения координат центров критических пузырьков показывает, что они расположены преимущественно на расстоянии $(1.5\text{-}3)\sigma_{11}$ от стенок. На начальной стадии роста пузырек имел форму, близкую к сферической. Контакт паровой фазы со стен-

[•] С.П. Проценко, sp@itp.uran.ru

кой происходил в процессе роста закритического пузырька. Дальнейший рост пузырька сопровождался поглощением частиц адсорбированного на стенке слоя жидкости и увеличением зоны контакта пузырек-стенка. Образование критического пузырька в форме сферического сегмента на поверхности стенки не зафиксировано.

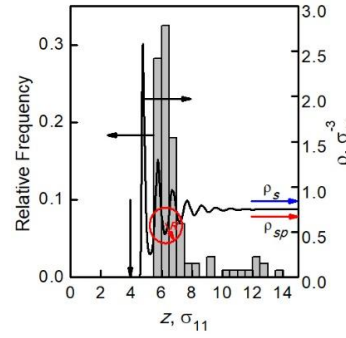


Рис. 1. Распределение плотности ρ(z) жидкости в направлении перпендикулярном стенке при средней плотности ρ_l = $0.75\,\sigma_{11}^{-3}$, $\varepsilon_{12}/\varepsilon_{11}$ = 0.567 и функция распределения мест зарождения жизнеспособных пузырьков с эффективным радиусом $R = 1.1\sigma_{11}$. Вертикальной стрелкой показано положение поверхности стенки, ρ_{sp} – плотность на спинодали, ρ_s, – на бинодали.

Отдельно рассчитаны барическая зависимость частоты зародышеобразования в однородной жидкости $J_{hom}(p)$ и частота нуклеации в пристеночном слое J_w. Величина частоты нуклеации J_{hom} в пределах погрешности расчетов совпадает с полученной в однородной системе с периодическими граничными условиями, где возможно только гомогенное зародышеобразование. Частота J_w примерно на два порядка больше J_{hom} и укладывается на зависимость $J_{hom}(p)$, что позволило определить эффективное давление в месте образования пузырьков около стенки. Увеличение частоты нуклеации связано с понижением давления в неоднородном пристеночном слое относительно давления в однородной жидкости.

Таким образом, в рассмотренных условиях смачивания зарождение паровых пузырьков в присутствии гладких стенок происходит по механизму гомогенной нуклеации как в объеме однородной жидкости, так и в пристеночном слое.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ 20-48-660027 р_а. Расчеты проведены на суперкомпьютере «Уран» ИММ УрО РАН.

S.P. Protsenko, V.M. Bryukhanov, V.G. Baidakov

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

BOILING-UP OF A STRETCHED LENNARD-JONES LIQUID IN A CHANNEL WITH SOLID SMOOTH WALLS

УДК 536.4

В.Г. Байдаков, А.М. Каверин, А.С. Панков

Институт теплофизики Уральского Отделения РАН,
Екатеринбург, 620016, Амундсена, 107А

СПОНТАННОЕ ВСКИПАНИЕ ПЕРЕГРЕТЫХ РАСТВОРОВ ГЕЛИЯ И ВОДОРОДА В МЕТАНЕ

Методами измерения времени жизни и непрерывного понижения давления исследована кинетика спонтанного вскипания перегретых растворов метан–гелий и метан–водород. Жидкость объемом V = 88 мм^3 перегревалась в стеклянных капиллярах. В первом методе заход в метастабильную область осуществлялся резким понижением давления, после чего измерялось время τ до вскипания жидкости. Частота зародышеобразования $J = (V\overline{\tau})^{-1}$, где $\overline{\tau}$ – среднее значение времени τ, полученное по 20 – 60 измерениям при заданных температуре T и давлении p. Во втором методе жидкость переводилась в метастабильную область плавным понижением давления. В опыте давление фиксировалось в момент вскипания жидкости. Скорости понижения давления составляли 0.02 – 0.08 МПа/с. При заданной температуре проводилось 20 – 50 измерений. Разность между давлением насыщения раствора при заданной температуре и наиболее вероятным значением давления вскипания принималась за величину предельного растяжения жидкости.

Исследуемый раствор готовился непосредственно в измерительной ячейке. Концентрация раствора определялась содержанием легкокипящего компонента в конденсируемой газовой смеси и контролировалась (± 0.02 моль %) по давлению насыщенных паров в процессе измерений. Для приготовления растворов использовались газы высокой чистоты. Паспортная чистота метана составляла 99.99, гелия – 99.995, водорода – 99.999 объемных процентов. Температура измерялась платиновым термометром сопротивления с погрешностью 0.02 К, давления – пружинными и цифровыми манометрами (± 0.005 МПа). Время ожидания вскипания определялось с погрешностью 0.01 с, погрешность фиксации давления вскипания при его непрерывном понижении составляла 0.01 МПа.

Измерения времени жизни раствора метен–водород проведены по изобарам p = 1.0, 1.6 и 2.0 МПа, раствора метан–гелий – по изобарам 1.6 и 2.0 МПа. Исследованный интервал частот зародышеобразования составил 2×10^4 – 1.6×10^8 м$^{-3}$с$^{-1}$. На экспериментальных изобарах можно выделить участки с резкой зависимостью частоты зародышеобразования от температуры ($\mathrm{d}\lg J/\mathrm{d}T$ = 7–11), где реализуется гомогенный механизм образования паровых зародышей в жидкости. Результаты измерения температуры достижимого перегрева исследуемых растворов [1, 2], соответствующие $J = 1\times10^7$ м$^{-3}$с$^{-1}$, представлены на рис. 1. Видно, что

растворение как гелия, так и водорода приводит к уменьшению температуры достижимого перегрева.

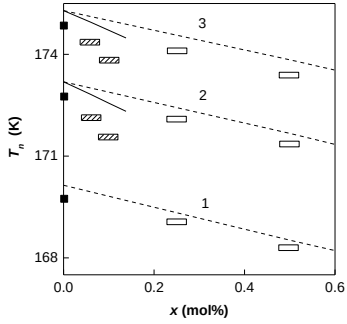


Рис.1. Зависимость температуры достижимого перегрева растворов метан–водород и метан–гелий от концентрации легкокипящего компонента в растворе. Прямоугольники – экспериментальные данные, прямые линии – расчет по теории гомогенной нуклеации. Светлые прямоугольники и штриховые линии относятся к раствору метан–водород, заштрихованные прямоугольники и сплошные линии – к раствору метан–гелий. 1 – p = 1.0 МПа, 2 – 1.6, 3 – 2.0.

Предельные растяжения растворов измерены в интервале температур T от 165 К до 175 К при пяти значениях T для раствора метан–водород и четырех значениях – для раствора метан–гелий. Частота зародышеобразования в опытах составляла $J = (0.2 – 1.5)\times10^8$ м$^{-3}$с$^{-1}$. Результаты измерений хорошо согласуются с достижимыми перегревами растворов, полученными методом измерения времени жизни.

Экспериментальные данные сопоставлены с расчетами по классической теории гомогенного зародышеобразования. Расчеты проводились в макроскопическом приближении. Как для чистого метана, так и для растворов экспериментальные значения температур предельного перегрева ниже их теоретических значений. Мы связываем полученное расхождение с неучетом в теории зависимости поверхностного натяжения от кривизны межфазной границы раствор–зародыш.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 18-19-00276.

Список литературы

1. **Байдаков В.Г.** Спонтанное зародышеобразование в перегретых растворах гелия в метане // Коллоид. журн. 2019. Т. 81. № 3. С. 281–288.
2. **Baidakov V.G., Kaverin A.M.** Attainable superheatings and stretchings of methane–hydrogen solutions // Int. J. Heat and Mass Transfer 2020. V. 163. 120498.

V.G. Baidakov, A.M. Kaverin, A.S. Pankov

Institute of Thermal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
Amundsen street 107A, Ekaterinburg, 620016, Russia

SPONTANEOUS BOILING-UP OF SUPERHEATED SOLUTIONS OF HELIUM AND HYDROGEN IN METHANE

УДК 536.423

С.А. Перминов, Е.В. Липнягов, М.А. Паршакова

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

ВЛИЯНИЕ МИКРОДОБАВКИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА НА КИНЕТИКУ ВСКИПАНИЯ ПЕРЕГРЕТОГО Н-ПЕНТАНА

Вводные замечания. В работе представлены результаты исследования влияния легкокипящей примеси (газа CO_2 с мольной долей < 1.5%) на кинетику спонтанного вскипания перегретого н-пентана в вертикальной стеклянной трубке с внутренним диаметром 5.6 мм. Верх трубки запаян. Опыты проводились как методом измерения времен жизни перегретой жидкости τ, так и методом непрерывного понижения давления *p* [1]. Одновременно велась скоростная видеосъемка процесса вскипания (2050 кадр/с).

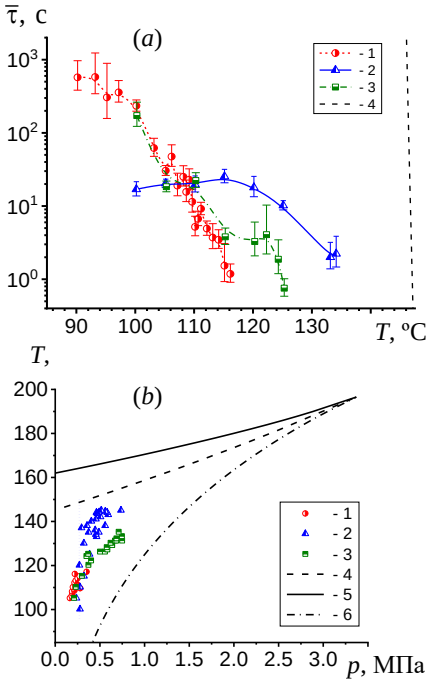


Рис. 1. Зависимость среднего времени жизни перегретого н-пентана от температуры при *p*=0.10 МПа (*a*) и фазовая диаграмма н-пентана (*b*): точки — эксперимент: *1*, *3* — н-пентан; *2* — н-пентан + CO_2; *4* — граница достижимого перегрева; 5 — спинодаль; 6 — бинодаль.

Методика эксперимента. Автоматизированная экспериментальная установка по изучению кинетики вскипания перегретой жидкости подробно описана в работе [2]. Перегрев осуществлялся путем понижения давления на термостатируемую жидкость объемом $2.80 \cdot 10^{-6}$ м^3 от 2.00 до 0.10 МПа в диапазоне температур *T* 90.2 - 145.1 °C. Газонасыщение происходило следующим образом: сначала исследуемая система, находящаяся при комнатной температуре и вакуумированная до -0.095 МПа (относительно атмосферы), заполнялась углекислым газом с понижением вакуумирования до -0.087 МПа, затем добавлялись пары

н-пентана с повышением давления смеси до 0.10 МПа. После заполнения измерительной ячейки полученная парогазовая смесь сжижалась при 2.00 МПа.

Результаты измерений. На рис. 1 (*a*) приведена температурная зависимость среднего времени жизни перегретого н-пентана (с добавкой CO_2 и без неё) при 0.10 МПа. На рис. 1 (*b*) представлена температура перегрева, соответствующая среднему давлению, при котором исследуемая жидкость вскипает, не достигая 0.10 МПа. Граница достижимого перегрева *4* рассчитана по теории гомогенной нуклеации для чистого н-пентана. Характерные «плато» на рис. 1 (*a*) принято объяснять воздействием фонового излучения (α-, β- и γ-частиц). Из данных видеосъемки следует, что экспериментальная граница достижимого перегрева определяется двумя видимыми дефектами на внутренней поверхности капилляра. С добавлением CO_2 вероятность вскипания перегретой жидкости вне дефектов становится равномерной, т.е. газ подавляет другие активные центры парообразования. Температура достижимого перегрева в серии опытов *2* (н-пентан с газом) увеличивается на 20 °С по сравнению с серией *1* (н-пентан без газа). При температуре 120 °С и ниже вероятность вскипания в системе н-пентан + CO_2 от величины T не зависит (среднее время жизни перегретой жидкости ~ 20 с, среднее давление при вскипании на сбросе ~ 0.27 МПа). После дегазирования и перезаполнения измерительной ячейки чистым н-пентаном данные серии *1* воспроизводятся (см. серию *3*), но при этом температура достижимого перегрева увеличивается на 10 °С. Полученный результат может быть связан с физической (обратимой) адсорбцией газа на поверхности стекла при вакуумировании системы.

Список литературы

1. Теплофизические свойства жидкостей в метастабильном состоянии / В.П. Скрипов, Е.Н. Синицын, П.А. Павлов и др.; М.: Атомиздат, 1980. 208 с.
2. **E.V. Lipnyagov, M.A. Parshakova, and S.A. Perminov,** Int. J. Heat and Mass Trans. 2017. V. 104. P. 1353-1361.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-08-00270).

S.A. Perminov, E.V. Lipnyagov, M.A. Parshakova

Institute of Thermal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia, 620016, Yekaterinburg, Amundcena st., 107A

INFLUENCE OF A MICROADDITIVE OFCARBON DIOXIDE ON THE KINETICS OF BOILING-UP OF SUPERHEATED N PENTANE

УДК 53.082

К.В. Лукьянов, А.Н. Котов, А.А. Старостин, П.В. Скрипов

Институт теплофизики УрО РАН,
620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 107а(•)

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ АНОМАЛИЙ ТЕПЛООТДАЧИ В ИМПУЛЬСНО ПЕРЕГРЕТЫХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ЖИДКОСТЯХ С ПРИМЕСЬЮ ВЛАГИ

Диэлектрические жидкости на основе углеводородов и нефтепродуктов являются основными компонентами технологических систем. Углеводороды являются основой для топлив, смазочных, изолирующих и охлаждающих жидкостей, играют важную роль в обеспечении безотказной и эффективной работы механизмов, машин, электротехнического оборудования, следовательно, требуют тщательного контроля. Свойства технических жидкостей в большой степени зависят от их чистоты. В опытах с импульсно нагреваемым зондом обнаружено, что малые концентрации влаги могут значительно влиять на значение температуры вскипания перегретых углеводородных жидкостей и на теплоотдачу с поверхности проволочного зонда [1].

Быстрый импульсный нагрев вещества позволяет избежать влияния конвекции на исследование теплофизических свойств вещества. Таким методом можно нагревать вещество до высоких температур за короткие промежутки времени, в частности, для перевода в перегретое состояние. Для нагрева исследуемого вещества используется малоинерционный нагреватель-зонд – платиновая проволока диаметром 20 мкм и длиной от 3 мм до 5 мм. Такая геометрия зонда позволяет минимизировать энергетические затраты на нагрев и достигнуть высокого быстродействия методики. Зонд является как нагревателем, так и термометром сопротивления, с которого снимается температурный отклик при нагреве исследуемого вещества [2]. При этом осуществляется перегрев тонкого слоя вещества, прилегающего к зонду. Разработана методика определения относительного коэффициента теплоотдачи с поверхности импульсно нагреваемого проволочного зонда в схожих температурно-временных условиях для образцов с разным влагосодержанием. Относительный коэффициент теплоотдачи в этом случае не зависит от времени и является характеристикой теплообмена в системе зонд-жидкость в нестационарных условиях [1, 3].

Обнаружено, что малые добавки влаги, на уровне 0,003%, могут увеличить теплоотдачу с поверхности зонда до 10% в гексане, декане и

(•) К.В Лукьянов, r.t.f@bk.ru

гексадекане. Присутствие малых добавок воды влияет на теплообмен в различных жидких углеводородах схожим образом. Это влияние проявляется увеличением переноса тепла от импульсно нагреваемой проволоки вблизи температуры спонтанного вскипания и понижением значения температуры вскипания. Увеличение внешнего давления до нескольких атмосфер нивелирует эффект влияния влаги на температуру вскипания и подавляет аномалию теплоотдачи с поверхности зонда. Создание же разряжения в образце усиливает указанные эффекты влияния влаги [3].

Возможно, при перегреве жидкости на проволочном зонде влага в малых концентрациях, содержащаяся в углеводородах в виде кластерных включений, порождает центры парообразования, активируя увеличение теплоотдачи с поверхности проволочного зонда и вскипание основного вещества при более низкой температуре. Вероятно, увеличение внешнего давления подавляет эти центры парообразования, поэтому наблюдаемый эффект увеличения теплоотдачи и снижения температуры вскипания уменьшается.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, грант № 19-19-00115.

Список литературы

1. Heat transfer under high-power heating of liquids. 4. The effect of water admixtures on the heat transfer in superheated hydrocarbons. / K.V. Lukynov, A.A. Starostin, P.V. Skripov.; International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. 106. 657-665.
2. Устройство для контролируемого импульсного воздействия на вещество. / А. Н. Котов, К. В. Лукьянов, В. Н. Сафонов, А. А. Старостин, В. В. Шангин. ПТЭ, 2020, № 6, с. 133–134.
3. Heat transfer enhancement in superheated hydrocarbons with traces of water: the effect of pressure. / Kirill V. Lukianov, Artem N. Kotov, Aleksandr A. Starostin, Pavel V. Skripov.; Interfacial Phenomena and Heat Transfer. 2019. 7(3). 283–294.

K.V. Lukianov, A.N. Kotov, A.A. Starostin, P.V. Skripov

Institute of Thermal Physics Ural Branch, Russian Academy of Sciences,
Russia 620016 Yekaterinburg, Amundsena, 107a

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR STUDYING ANOMALIES OF HEAT TRANSFER IN PULSE-SUPERHEATED HYDROCARBON LIQUIDS WITH A MOISTURE

УДК 536.2

А.В. Артамонов, П.Г. Макаров, А.С. Дмитриев

Национальный исследовательский университет "МЭИ",
Москва, 111250, Красноказарменная улица, дом 14

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ЛЕЙДЕНФРОСТА НА НЕОДНОРОДНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ СЛОЖНОЙ СТРУКТУРЫ

Эффект Лейденфроста, заключающийся в возникновении тонкой паровой пленки между каплей жидкости и твердой сильно перегретой поверхностью, на которую эта каля помещена, позволяет сильно увеличить время испарения капли [1]. Этот эффект впервые был рассмотрен в 1756 году, однако его активное изучение началось лишь в последнее время. Отчасти этот интерес связан с появлением оборудования, позволяющего рассмотреть поведение капель на поверхности, отчасти с возможностью его практического применения, например в технологиях lab-on-a-chip. Но в то время как большинство работ посвящено эффекту Лейденфроста на однородной поверхности, в настоящем же исследовании рассматривается поведение капель воды на сильно перегретой неоднородной поверхности сложной структуры, представляющей собой две металлические струны трех различных конфигураций.

Первая конфигурация струн представляет из себя однородные металлические струны диаметром 0,5 мм, изготовленные из сплава нихром. Вторая конфигурация – металлические струны с прерывистой обмоткой: вокруг струн диаметром 0,4 мм наматывалась тонкая металлическая струна 0,1 мм, причём шаг обмотки составлял 0,1 мм. Третья конфигурация – металлические струны со сплошной обмоткой: в данной конфигурации сегменты нити, намотанной на струну, плотно прилегали друг к другу. Также стоит обратить внимание на то, что в последних двух конфигурациях направление обмотки на двух струнах разнонаправлено, таким образом проекция на виде сверху представляла собой шевронную структуру. Измерение температуры струн производилось с помощью контактной термопары и бесконтактного тепловизора.

В случае контакта капли с однородными металлическими струнами эффект Лейденфроста наблюдается при всём спектре температур (от 300 °C до 590 °C), при этом капля либо покоилась, либо совершала хаотические колебательные движения. Капля удерживалась над струнами, при условии того, что диаметр капли был больше расстояния между струнами. В результате испарения диаметр капли уменьшался, и когда он достигал размеров, примерно равных расстоянию между струнами, капля проваливалась между ними (рис.1).

а) б)

Рис. 1. Фотография капли в начальный (а) и конечный (б) момент времени жизни

Рассмотрим второй тип поверхности - металлические струны с прерывистой обметкой. Эффект Лейденфроста возникает при температуре струн около 420 °С: капля удерживалась над струнами в неподвижном положении между сегментами обмотки. При повышении температуры до 450 °С наблюдалось направленное движение капли вдоль поверхности струн, направление которого зависело от направления рисунка обмотки (рис.2).

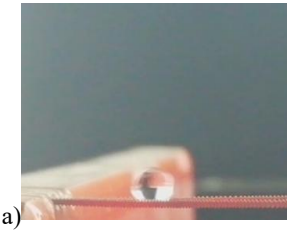
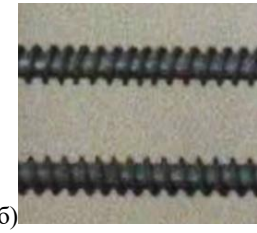
а)  б) 

Рис. 2. Движение капли справа-налево: а) фотография профиля капли; б) соответствующий этому случаю рельеф струн

При контакте капель с третьим типом поверхности – металлическими струнами со сплошной обметкой – эффект Лейденфроста возникает при температуре струн около 420 °С. Причём капли начинают направленное движение сразу после контакта со струнами.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №17-19-01757

Список литературы

1. Кипение и эффект Лейденфроста / Джерл Уокер; Государственный Университет Кливленда,1994.

A.V. Artamonov, P.G. Makarov, A.S. Dmitriev

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

STUDY OF THE LEIDENFROST EFFECT ON HETEROGENEOUS SURFACES OF COMPLEX STRUCTURE

УДК 536.421.4

Е.О. Розанов[1,2], *С.П. Проценко*[1], *Б.Г. Байдаков*[1]

[1] Институт теплофизики УрО РАН, 620016, Екатеринбург, Амундсена, 107а
[2] Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 620002, Екатеринбург, Мира, 19(•)

МЕТАДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПЕРЕОХЛАЖДЕННОЙ ЛЕННАРД-ДЖОНСОВСКОЙ ЖИДКОСТИ: ВЫБОР КОЛЛЕКТИВНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ ДЛЯ ОПИСАНИЯ НУКЛЕАЦИИ

При переохлаждении жидкость может конечное время оставаться в метастабильном состоянии, не кристаллизуясь. Кристаллизация начинается с появления критического зародыша, работа образования которого W_* равна величине барьера энергии Гиббса ΔG, разделяющего метастабильное и стабильное состояния. Величина W_* обычно находится косвенно через частоту зародышеобразования J из соотношения $J = \rho_l Z D \exp\left(-W_c / k_B T\right)$, где ρ_l – плотность переохлажденной жидкости, Z – фактор Зельдовича, D – коэффициент диффузии зародышей в пространстве их размеров.

Метод метадинамики [1] – единственный известный метод прямого нахождения величины ΔG. В этом методе система выводится из метастабильного состояния путем добавления к ее гамильтониану потенциала смещения. Из добавленных потенциалов можно построить ландшафт свободной энергии системы и найти величину барьера ΔG.

Для применения метадинамики необходимо правильно выбрать коллективные переменные, описывающие состояния системы в процессе фазового превращения. Метадинамика успешно применялась для умеренно переохлажденной жидкости (T/T_m = 0.7–0.8, где T – температура метастабильной жидкости, T_m – температура плавления) с использованием в качестве коллективных переменных параметра Стейнхардта $Q6$ для поднабора из 350 атомов и потенциальной энергии системы [2].

Целью данной работы является проверка применимости этих переменных для других состояний. Моделировалась система из 5324 частиц леннард-джонсовского (ЛД) вещества на изобарах p = -0.995, 0 и 6.912 (в единицах ε/σ^3, где ε и σ – параметры ЛД потенциала) и изотермах T = 0.55, 0.7 и 0.865 (в единицах ε/k_B) при различном переохлаждении и сжатии, соответственно.

Полученные высоты барьеров нуклеации сравнивались с данными [3], вычисленными из частот зародышеобразования. Значения высоты барьера кристаллизации в пределах погрешности согласуются с величи-

(•) Е.О. Розанов: vvecme10@gmail.com

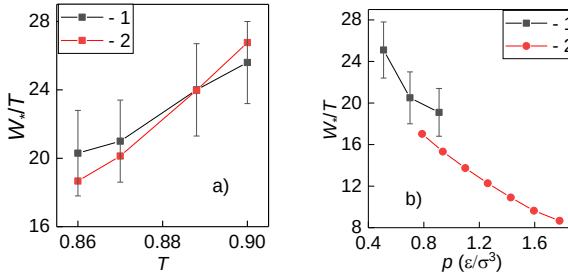


Рис. 1. Высота активационного барьера кристаллизации при давлении p = 6.912 (a) и температуре T = 0.55 (b): *1* — результаты данного исследования, *2* – результаты [3].

нами [3] для умеренно метастабильных состояний (Рис. 1a), но превышают их для слабо метастабильных состояний (Рис. 1b). Сделан вывод, что для этих состояний причиной превышения W_* является некорректное описание выбранной переменной $Q6$ зародышей большого размера. В дальнейших исследованиях планируется использование таких коллективных переменных, как локального параметра порядка $Q6$ и размера наибольшего зародыша.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ 20-48-660027 р_а. Моделирование проведено с использованием суперкомпьютера «Уран» ИММ УрО РАН.

Список литературы

1. **Laio A., Parrinello M.** Escaping free-energy minima // Proc. Nat. Acad. Sci. USA, vol. 99, 20, 2002. P. 12562-12566.
2. **Trudu F., Donadio D., Parrinello M.** Freezing of a Lennard-Jones Fluid: From Nucleation to Spinodal Regime // Phys. Rev. Letters, vol. 97, 10, 2006. P. 105701.
3. **Baidakov V.G., Protsenko K.R.** Spontaneous Crystallization of a Supercooled Lennard-Jones Liquid: Molecular Dynamics Simulation // J. Phys. Chem. B, vol. 123, 38, 2019. P. 8103-8112.

E.O. Rozanov [1,2], *S.P. Protsenko* [1], *V.G. Baidakov* [1]

[1] Institute of Thermal Physics UB RAS,
Russia, 620016, Ekaterinburg, Amundsena, 107A
[2] Ural Federal University, Russia, 620002, Ekaterinburg, Mira, 19

METADYNAMICS STUDY OF CRYSTALLIZATION IN SUPERCOOLED LENNARD-JONES LIQUID: CHOOSING COLLECTIVE VARIABLES FOR NUCLEATION DESCRIPTION

УДК 536.24

А.А. Игольников, С.Б. Рютин, П.В. Скрипов

[1] Институт теплофизики, УрО РАН,
Екатеринбург, 620016, Амундсена, 107а

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООБМЕНА В РАСТВОРАХ ЗА ЛИНИЕЙ РАВНОВЕСИЯ ЖИДКОСТЬ-ЖИДКОСТЬ

Работа современных микропроцессоров сопровождается мощным локальным тепловыделением. В связи с этим научным сообществом активно изучаются способы интенсификации теплообмена в таких устройствах. Наряду с применением микроканальных технологий [1], потенциальным теплоносителем могут служить растворы, имеющую ограниченную в координатах температура-концентрация область смешения. Это означает, что система, переведенная из изначально устойчивого состояния в метастабильное или нестабильное состояние относительно кривой сосуществования фаз, подвергается нуклеации или спинодальному распаду соответственно. Нуклеация – это локализованный процесс, который требует преодоления энергетического барьера для образования зародышей стабильной фазы и их дальнейшего роста. Спинодальный распад, наоборот, является делокализованным процессом, который происходит одновременно по всему домену и не требует преодоления энергетического барьера. В этом случае релаксация системы сопровождается усилением случайных неоднородностей концентрации, и оказывается возможным проявление модулированных релаксационных структур [2]. В результате такого процесса усиление флуктуаций плотности приводит к разделению изначально однофазного двухкомпонентного раствора на две жидкие фазы различного состава. Предполагается, что в маловязких жидкостях процесс спинодального распада сопровождается самоиндуцированной конвекцией, что приводит к интенсификации теплообмена в смеси. Таким образом, частично-смешивающиеся двухкомпонентные соединения, гипотетически, могут быть использованы в качестве теплоносителя в процессах с мощным тепловыделением.

Предмет настоящей работы – теплообмен в короткоживущих состояниях изначально стабильного двухкомпонентного соединения, имеющего нижнюю критическую температуру растворения (НКТР). В качестве такого соединения был выбран водный раствор полипропиленгликоля-425, поскольку компоненты смеси являются нетоксичными и могут быть безопасно использованы в относительно больших объемах. Принимая во внимание короткое время жизни состояний нестабильных относительно линии равновесия жидкость-жидкость, авторами был выбран метод управляемого импульсного нагрева проволочного зонда, помещенного в исследуемую жидкость. Толщина зонда со-

ставляет ~ 20 мкм, длина ~ 1 см. Метод позволяет напрямую контролировать параметры тепловыделения в течение всего импульса, а также регистрировать функцию отклика во всем диапазоне нагрева. В ходе импульсного нагрева регистрируются значения падения напряжения на зонде и тока в цепи зонда в зависимости от времени. Регистрация первичных данных сопровождается расчетом мощности тепловыделения, температуры зонда – термометра сопротивления и плотности теплового потока через его поверхность [3]. Начальное состояние раствора отвечает области термодинамической устойчивости. Параметром эксперимента является давление.

Наиболее значимые результаты были получены для растворов с концентрацией ППГ от 0,1 до 0,4 объемных долей. Анализ функций отклика при заданной мощности тепловыделения на зонде показал, что при переходе в область неустойчивых состояний существенно повышается мгновенный коэффициент теплоотдачи, что служит признаком начала спинодального распада, естественного релаксационного процесса в данной области фазовой диаграммы. Более того, при углублении в область неустойчивых состояний нормальный порядок кривых нагрева по отношению к пошаговому увеличению давления, изменяется на противоположный: меньшие значения интенсивности теплообмена соответствуют более высоким значениям давления. Данный эффект объясняется сужением области, ограниченной спинодалью расслаивания, по мере роста давления.

Результаты, представленные в настоящей работе, могут служить основой для поиска и разработки теплоносителей нового поколения.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №19-19-00115.

Список литературы

1. **Tuckerman D.B., Pease R.F.W.** High-performance heat sinking for VLSI // IEEE Electron Dev. Lett. EDL. 1981. V. 2 (5). P. 126–129.
2. **Скрипов В.П., Скрипов А.В.** // УФН. 1979. Т. 128 (2). С. 193–231.
3. **Rutin S. B., Skripov P. V.** Apparatus for studying heat transfer in nanofluids under high-power heating // J. Eng. Thermophys. 2012. V. 21 (2). P. 144–153.

A.A. Igolnikov, S.B. Rutin, P.V. Skripov

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

FEATURES IN HEAT TRANSFER IN SOLUTIONS BEYOND THE LIQUID-LIQUID EQUILIBRIUM LINE

УДК 536.42

И.И. Поволоцкий, Д.В. Волосников, П.В. Скрипов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук,
Екатеринбург, 620016, Амундсена, 107а

ТЕПЛООТДАЧА К ВОДНЫМ РАСТВОРАМ С ШИРОКОЙ ОБЛАСТЬЮ НЕСОВМЕСТИМОСТИ КОМПОНЕНТОВ

Водные растворы – это наиболее распространенные растворы в хозяйственной сфере и жизнедеятельности человека. Снижение токсичности, забота об экологии, необходимость сохранения здоровья и биологического разнообразия вынуждает переходить на более безопасные водорастворимые компоненты в различных теплоносителях, антиобледенителях и гидравлических жидкостях. В этой связи, токсичные, но широко применяющиеся вещества, типа этиленгликоли, по возможности, заменяются на пропиленгликоль [1] и различные полипропиленгликоли. Однако, последние имеют ограниченную область смешения с водой, являясь типичными растворами с нижней критической температурой растворения (НКТР); в свою очередь, быстрый заход за линию НКТР и диффузионную спинодаль раствора сопровождается существенным повышением теплоотдачи при фазовом разделении по механизму жидкость-жидкость в виду перехода механизма переноса тепла от тепловой проводимости к сложному (кондуктивно-конвективному) механизму [2-4].

Цель работы состояла в изучении характерных черт теплоотдачи к импульсно перегретым (относительно линии НКТР и диффузионной спинодали) растворам относительно теплоотдачи, наблюдаемой в области устойчивых состояний раствора и в чистых компонентах в сопоставимых условиях опыта, в том числе, на фоне фазового перехода жидкость-жидкость и спинодального распада. Для ее достижения был применен метод управляемого импульсного нагрева проволочного зонда, а именно, режим термостабилизации при достижении температурой зонда заданного значения T_{st} [5]. Метод удобен для сопоставления коэффициентов мгновенной теплоотдачи к растворам, в том числе, в не вполне устойчивых (выше линии равновесия жидкость-жидкость) и термодинамически неустойчивых (выше диффузионной спинодали) состояниях. Объектами изучения служили водные растворы ППГ-425 (полипропиленгликоль с молекулярной массой $M_n \sim 425$) и монобутилового эфира гликоля в полной области составов. Первый раствор имеет НКТР, второй раствор – замкнутую область несовместимости компонентов. Параметрами опыта служили концентрация раствора и значение T_{st} при заданном давлении.

В опытах показана принципиальная осуществимость измерений тепловых свойств водных растворов в не вполне устойчивых состояниях. Данный результат позволяет перейти к систематическому исследованию теплопереноса системами с двойной метастабильностью (выше линии равновесия жидкость-жидкость и плавного продолжения бинодали жидкость-пар за эту линию), а также теплопереноса на фоне спинодального распада неустойчивых систем, как наиболее естественного в данной области фазовой диаграммы релаксационного процесса. В некоторых температурно-временных условиях обнаружено превышение мгновенным коэффициентом теплоотдачи раствора соответствующего значения чистой (!) воды. Данный результат получен сопоставлением исключительно первичных данных опыта и не отягощен модельными ограничениями. Подобные системы имеют перспективу в качестве теплоносителей в процессах, где нельзя исключить вероятность мощного локального тепловыделения. Развитие исследования будет направлено на выяснение обоснованности этой перспективы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, грант № 19-19-00115.

Список литературы

1. **LaKind J.S., McKenna E.A., Hubner R.P., Tardiff R.G.** A Review of the Comparative Mammalian Toxicity of Ethylene Glycol and Propylene Glycol // Crit. Rev. Toxicol. 1999. V. 29. P. 331-365.
2. **A.A. Igolnikov, S.B. Rutin, P.V. Skripov.** Short-term measurements in thermally-induced unstable states of mixtures with LCST // Thermochimica Acta. 2021. V 695. P. 178815.
3. **Volosnikov D.V., Povolotskiy I.I., Igolnikov A.A., Son L.D., Vasin M.G., Skripov P.V.** Intensification of heat transfer during spinodal decomposition of a superheated aqueous oligomer solution // Book of Abstracts XXXV International Conference on Equations of State for Matter. March 1–6 2020. Elbrus Kabardino-Balkaria, Russia. p.205.
4. **S. B. Rutin, P. V. Skripov, A. A. Igolnikov**. Non-Stationary Heat Transfer Beyond Diffusion Spinodal of a Solution // AIP Conference Proceedings. 2020. V 2313, P 030046.
5. **Скрипов П.В., Старостин А.А., Волосников Д.В.** Перенос тепла в импульсно перегретых жидкостях // ДАН. 2003. Т. 390. № 2. С. 192-195.

I.I. Povolotskiy, D.V. Volosnikov, P.V. Skripov

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

HEAT TRANSFER TO AQUEOUS SOLUTIONS WITH A WIDE RANGE OF INCOMPATIBILITY OF COMPONENTS

УДК 536.423

К.А. Бусов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук,
Екатеринбург, 620016, Амундсена 107а [(•)]

ВЛИЯНИЕ ПОПЕРЕЧНОГО ВОЗДУШНОГО ПОТОКА НА СТРУЮ ПЕРЕГРЕТОЙ ВОДЫ

Исследование распыления струй жидкостей находит широкое практическое применение в различных отраслях: в сельском хозяйстве, машиностроении, медицине [1,2]. Актуальными для исследователей остаются задачи, связанные с дисперсионным составом капель, с механизмами разрушения струй, с поиском факторов, оказывающих воздействие на истекающую среду. Одним из эффективных способов, влияющих на распыление вещества, является использование набегающего потока воздуха под различными углами атаки [3-5]. Цель данного экспериментального исследования заключалась в изучении воздействия поперечного воздушного потока на форму, структуру и угол раскрытия струи перегретой воды.

Истечение вскипающей струи воды происходило из сосуда высокого давления через короткий цилиндрический канал (диаметр 0.5 мм) с острыми входными и выходными кромками в атмосферу. Начальные условия (температура, давление) в рабочей камере соответствовали линии фазового равновесия и изменялись в широком диапазоне: T=380 – 580 K, p=0.1 – 10 МПа. Поперечный обдув струи осуществлялся двухлопастным вентилятором. Скорость воздушного потока изменялась в интервале от v=1.5 м/с до v=13 м/с.

Проведенные исследования показали, что внешнее воздействие поперечным потоком воздуха на вскипающую струю оказывает влияние при различных степенях перегрева жидкости. При небольших перегревах воды (T_s<420 K) и малых скоростях (v<2 м/с) воздушного потока наблюдалось практически невозмущенное жидкостное ядро с отклоненным от оси канала облаком капель. Увеличение скорости потока воздуха приводило к росту волн возмущений вдоль струи и к большему сносу капель с ее поверхности. При умеренных, высоких и предельных перегревах, когда жидкостная сердцевина в струе отсутствовала, наблюдалось истечение двухфазной среды в виде парового конуса (рис. 1а). С увеличением скорости набегающего потока воздуха отмечались значительные изменения в форме струи перегретой воды и в угле ее отклонения от оси канала (рис. 1 б-г.).

[(•)] К.А. Бусов, kbusov@itp.uran.ru

Рис. 1. Форма струи перегретой воды при различных скоростях поперечного воздушного потока: *а* – 2 м/с; *б* – 4 м/с *в* – 10 м/с *г* – 13 м/с. Температура жидкости в сосуде высокого давления составляла T_s=520 K.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации (грант № МК-1933.2020.8), РФФИ (грант № 19-08-00091).

Список литературы

1. **Lefebvre A. H., McDonell V. G.** Atomization and Sprays, CRC Press, 2017.
2. **Eggers J., Villermaux E.** Physics of liquid jets // Rep. Prog. Phys. 2008. V. 71. P. 1 – 79.
3. **Prakash R. S., Gadgil H., Raghunandan B. N.** Breakup processes of pressure swirl spray in gaseous cross-flow // International journal of multiphase flow. 2014. V. 66. P. 79-91.
4. **Walker I. J., Nickling W. G.** Dynamics of secondary airflow and sediment transport over and in the lee of transverse dunes // Progress in Physical Geography. 2002. V. 26. №. 1. P. 47-75.
5. **Fuller R. P. et al.** Effects of injection angle on atomization of liquid jets in transverse airflow // AIAA journal. 2000. V. 38. №. 1. P. 64-72.

K.A. Busov

Institute of Thermal Physics UB RAS,
Russia 620016 Yekaterinburg, Amundsen, 107a

EFFECT OF A TRANSVERSE AIRFLOW ON A SUPERHEATED WATER JET

УДК 532.5

А.В. Вяткин, М.В. Пискунов, А.Е. Семёнова, Н.А. Хомутов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск, 634050, пр. Ленина, 30(•)

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТОПЛИВНЫХ ЭМУЛЬСИЙ НА РАСТЕКАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ КАПЕЛЬ ПРИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОМ УДАРЕ О СТЕНКУ

Взаимодействие капли с твердой поверхностью привлекает огромное внимание научного сообщества из-за комплексного характера физических явлений, характеризующих этот процесс [1,2]. Большая часть известных исследований в этой области имеет дело с однофазными ньютоновскими жидкостями. Однако, промышленные и хозяйственно-бытовые технологии, фундаментально основанные на изучаемом процессе, такие как спрейное охлаждение, топливные спреи в ДВС, фармацевтика, пищевая промышленность, функциональные покрытия, агропромышленные спреи, антиобледенители, смазочные материалы, закаливание металлов, печать, обеспечиваются на данный момент современными многокомпонентными рабочими жидкостями для увеличения их эксплуатационных качеств [1,2]. Чрезвычайно мало информации доступно на сегодня о влиянии реологических свойств многокомпонентных многофазных жидкостей [3], включая эмульсии [4,5], жидкости с предельным напряжением сдвига и псевдопластичные жидкости, на динамику растекания отдельных капель. Более того, недавние исследования показывают, что межфазное натяжение на границе раздела двух жидкостей в капле также может оказывать влияние на процесс растекания [3]. В настоящей работе исследуется соударение капель эмульсий типа «вода-в-масле», стабилизированных широким спектром ПАВ, с гладкой поверхностью сапфирового стекла при нормальных условиях. Компоненты во всех рассматриваемых эмульсиях смешаны при одинаковых концентрациях, в то время как природа эмульгатора (ПАВ) изменяется. Исследовано влияние поверхностной энергии на межфазной границе «жидкость-жидкость» на коэффициент максимального растекания капли эмульсии. Кроме того, в исследовании рассматривается влияние предельного напряжения сдвига эмульсий на динамику растекания капель. Полученные экспериментально значения коэффициента максимального растекания капель эмульсий сравнивается с существующими теоретическими моделями для ньютоновских и неньютоновских жидкостей. Получено эмпирическое соотношение для коэффициента максимального растекания капли эмульсии

(•) М.В. Пискунов, piskunovmv@tpu.ru (E-mail одного из авторов)

с учетом неньютоновского поведения и поверхностной энергии на межфазной границе «жидкость-жидкость».

В исследовании эмульсии типа «вода-в-масле» приготовлены из следующих несмешивающихся жидкостей: дистиллированная вода в качестве дисперсной фазы, химически чистый н-декан и базовое изопарафиновое масло в качестве непрерывной фазы. В качестве поверхностно-активных веществ использованы сорбитанмоноолеат, полиизобутиленсукцинамид, моноэтаноламиды жирных кислот и соевый лецитин. Экспериментальное исследование предполагало проведение высокоточных измерений реологических и поверхностно-активных характеристик. В частности, поверхностное натяжение жидкостей на границе раздела «жидкость-воздух» измерялось методом кольца Дю Нуи. Межфазное натяжение на границе раздела «жидкость-жидкость» определялось методом вращающейся капли. Реологические свойства жидкостей измерялись с использованием ротационного реометра. Для определения предельного напряжения сдвига и пластической вязкости эмульсий, продемонстрировавших вязкопластичное поведение Бингамовских жидкостей, применена реологическая модель Бингама. При анализе динамики растекания капель эмульсий использованы число Рейнольдса для неньютоновских жидкостей, капиллярное число Бингама, число Вебера для капель дисперсной фазы эмульсий.

Список литературы

1. **Yarin A.L.** Drop impact dynamics: Splashing, spreading, receding, bouncing // Annu. Rev. Fluid Mech. 2006. Vol. 38. P. 159–192.
2. **Josserand C., Thoroddsen S.T.** Drop Impact on a Solid Surface // Annu. Rev. Fluid Mech. 2016. Vol. 48. P. 365–391.
3. **Blanken N. et al.** Impact of compound drops: a perspective // Curr. Opin. Colloid Interface Sci. 2021. Vol. 51. P. 101389.
4. **Prunet-Foch B. et al.** Impacting Emulsion Drop on a Steel Plate: Influence of the Solid Substrate // J. Colloid Interface Sci. 1998. Vol. 199, № 2. P. 151–168.
5. **Kumar A., Mandal D.K.** Impact of emulsion drops on a solid surface: The effect of viscosity // Phys. Fluids. 2019. Vol. 31, № 10.

A.V. Vyatkin, M.V. Piskunov, A.E. Semyonova, N.A. Khomutov

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

EFFECT OF FUEL EMULSION CHARACTERISTICS ON ISOTHERMAL SPREADING AND SPLASHING OF DROPS IMPINGING ONTO A SURFACE

УДК 536.42

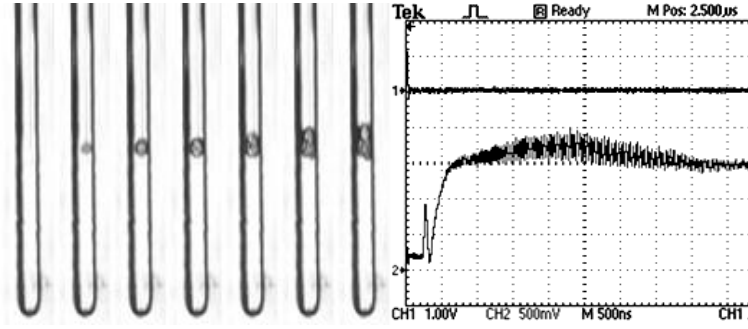
А.Н. Котов, А.Л. Гурашкин, А.А. Старостин, П.В. Скрипов

Институт Теплофизики УрО РАН,
620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 107а(•)

ЛОКАЛЬНАЯ АКТИВАЦИЯ ВСКИПАНИЯ ПЕРЕГРЕТОЙ ЖИДКОСТИ ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ НА ТОРЦЕ СВЕТОВОДА

Доклад посвящен изучению быстрых процессов локальных изменений в жидкости, сопровождающих макроскопический фазовый переход. Один из путей выяснения их природы и характерных времен состоит в развитии микромасштабной оптической методики [1, 2] для локальной активации и наблюдения процесса вскипания в заданный момент времени и в заданном месте системы. Данный подход основан на применении современной техники преобразования оптических сигналов оптоволоконного рефлектометра.

Присоединение к световодному плотномеру [1, 2] лазерного импульсного источника позволило инициировать разрушение перегретого состояния в точке наблюдения, а именно – на торце световода, погруженного в капилляр чистой пузырьковой камеры с перегретой жидкостью (н-пентан). Основное влияние на активацию процесса вскипания отмечено от интенсивности активирующего излучения [3]. Активационный порог оказался различным для трех световодов в измерительной



а б

Рис. 1. Видеоряд (а) с быстродействующей фотокамеры (6000 к/с) показывает развитие процесса активированного через световод вскипания н-пентана в капилляре пузырьковой камеры при температуре 130°С. После инициирующего воздействия в течении 1 мкс на осциллограмме наблюдается быстрое нарастание отраженного от торца световода сигнала (б).

(•) А.Н. Котов, artem625@mail.ru

ячейке, изготовленных по одинаковой методике. Полученные результаты позволяют предположить нетепловой характер инициирующего воздействия для разрушения перегретого состояния, по крайней мере, для наших опытов с пентаном. Возможно, интенсивное электромагнитное излучение играет более важную роль в разрушении перегретой жидкости, чем считалось ранее. Интересные результаты получены в параллельных с активацией измерениях на световодном плотномере-рефлектометре. На рис. 1а показан видеоряд последовательно записанных кадров изображения капилляра пузырьковой камеры после подачи активирующего импульса через торец световода в перегретом пентане при температуре 130°C и атмосферном давлении. Перегрев относительно линии равновесия жидкости с паром составляет 94°C. На рис. 1б показан вид отраженного от торца световода оптического сигнала в момент активации вскипания пентана.

Анализ условий опыта позволяет предположить, что сигнал формируется в условиях роста паровой пленки на торце световода и отражает динамику уменьшения плотности, прилегающего к торцу световода слоя вещества.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, грант № 19-19-00115.

Список литературы

1. Experimental Determination of Superheated Liquid Density by the Optical Fiber Method / A. L. Gurashkin, A. A. Starostin, A. A. Uimin, A. D. Yampol'skiy, G. V. Ermakov, P. V. Skripov; J. Eng. Thermophys. 2013. V. 22, No. 3. pp. 194-202.
2. Going to Spontaneous Boiling-Up Onset / E.V. Lipnyagov, A.L. Gurashkin, A.A. Starostin, and P.V. Skripov; J. Eng. Thermophys. 2018. V. 27, No. 3. pp. 307-318.
3. Импульсная активация вскипания перегретой жидкости лазерным излучением / А.Л. Гурашкин, А.А. Старостин, П.В. Скрипов; ПЖТФ, 2020, том 46, вып. 12, с. 47-50.

A.N. Kotov, A.L. Gurashkin, A.A. Starostin, P.V. Skripov

Institute of Thermal Physics Ural Branch, Russian Academy of Sciences,
Russia 620016 Yekaterinburg, Amundsena, 107a

LOCAL BOILING - UP ACTIVATION OF A SUPERHEATED LIQUID INITIATED BY LASER PULSE AT THE END OF THE OPTICAL FIBER

УДК 536.4

В.Н. Андбаева, М.Н. Хотиенкова

Институт теплофизики УрО РАН,
620016, Екатеринбург, Амундсена, 107А(•)

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БИНАРНЫХ СИСТЕМ

Представляются результаты измерения капиллярной постоянной a^2, определения поверхностного натяжения σ и расчета адсорбции Γ бинарных систем. Опыты проведены с алканами метанового ряда (пропан, н-бутан, метан, этан) насыщенными гелием, азотом и водородом. Для определения σ дифференциальным вариантом метода капиллярного поднятия измерена капиллярная постоянная указанных растворов в интервале температур от тройной до близкой к критической точки растворителя при давлениях до 4 МПа. Концентрация низкокипящего компонента в растворе определялась по уравнению состояния раствора, либо по имеющимся экспериментальным данным о фазовом равновесии исследуемой системы.

Нами исследованы как газонасыщенные системы (пропан–гелий, н-бутан–гелий, пропан–водород, н-бутан–водород), так и растворы типа жидкость – жидкость (метан–азот, этан–азот).

Несмотря на малую растворимость водорода и гелия в жидком пропане и н-бутане, их содержание в поверхностном слое оказывается значительным и резко возрастает при приближении к тройной точке растворителя. Во всем исследованном температурном интервале производная $\left(\partial\sigma/\partial x\right)_T$ раствора пропан–водород отрицательна [1], в то время как для системы пропан–гелий она положительна [2], достигает максимума при $T/T_c \approx 0.4$ и становится отрицательной, когда $T/T_c \geq 0.5$ (см. рис. 1), где T_c – критическая температура растворителя. На рис. 1 $\varepsilon = 1 - T/T_c$ – приведенная температура.

В отличии о газонасыщенных растворов, температурная зависимость производной $\left(\partial\sigma/\partial x\right)_T$ для растворов с полной взаимной растворяемостью компонентов зависит от концентрации. Для раствора этан–азот [3] имеем:

$$\left(\frac{\partial\sigma}{\partial x}\right)_T = \sum_{i=0}^{7} d_i T^i + 2 \cdot x \cdot \sum_{i=0}^{7} f_i T^i \,. \qquad (1)$$

Коэффициенты d_i и f_i уравнения (1) приведены в работе [3].

(•) В.Н. Андбаева, andbaeva@mail.ru

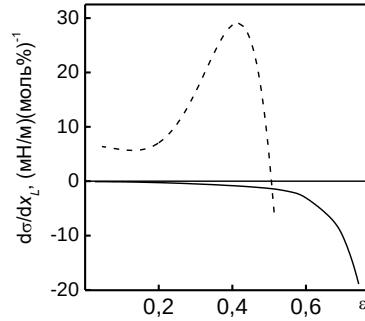


Рис. 1. Зависимость производной $(\partial\sigma/\partial x)$ от приведенной температуры. Сплошная линия – раствор пропан–водород [1], пунктирная линия – пропан–гелий [2].

Данные по поверхностному натяжению использованы для расчета относительной адсорбции. Линейность изотерм поверхностного натяжения для газонасыщенных растворов и малое количество растворимого компонента приводят к линейности концентрационной зависимости адсорбции *Г*.

Показано, что растворителя характер концентрационной зависимости поверхностного натяжения смеси определяется не только степенью его неидеальности, но и величиной растворимости легколетучего компонента в жидкой фазе.

Список литературы

1. **Andbaeva V.N., Baidakov V.G.** Capillary constant and surface tension of propane (R-290) with small additives of hydrogen // Fuel. 2021. V. 287. P. 119546.
2. **Baidakov V.G., Khotienkova M.N.** Capillary constant and surface tension of propane (R-290) with helium dissolved in it // Int. J. Refrig. 2019. V. 98. P. 261—265.
3. **Baidakov V.G., Kaverin A.M., Khotienkova M.N., Andbaeva V.N.** Surface tension of an ethane–nitrogen solution. 1: Experiment and thermodynamic analysis of the results // Fluid Phase Equilib. 2012. V. 328. P. 13—20.

V.N. Andbaeva, M.N. Khotienkova

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

THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF BINARY SYSTEMS

УДК 536.441

Н.С. Богатищева, Е.Д. Никитин

Институт теплофизики УрО РАН,
Екатеринбург, 620016, Амундсена, 107а

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ АВТОМОДЕЛЬНОСТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ КРИТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОМОЛОГИЧЕСКИХ РЯДОВ

Критические константы вещества являются его фундаментальными характеристиками. Одна из основных проблем экспериментального определения критических параметров связана с термической нестабильностью исследуемых веществ. В гомологическом ряду с увеличением молекулярной массы гомолога критическая температура растет, в то время как прочность химических связей в молекуле остается постоянной или снижается. Поэтому в пределах одного гомологического рядах первые несколько членов являются стабильными, а более тяжелые гомологи нестабильны в своей критической точке.

Предложено несколько методов измерения критических свойств термонестабильных веществ, которые имеют свои пределы применимости. Свойства соединений с более высокой молекулярной массой можно только рассчитать. Для решения этой проблемы в основном применяются методы группового вклада и различные способы экстраполяции экспериментальных данных, полученных для начальных членов гомологического ряда, на последующие. Анализ существующих методов показал, что большинство из них хорошо описывает экспериментальные данные веществ с небольшой молекулярной массой и при этом имеет низкую точность в описании экспериментальных данных более тяжелых гомологов.

Предложенный в работе метод применим для оценки критических свойств химических соединений с относительно высокой молекулярной массой. Метод основан на гипотезе функциональной автомодельности и позволяет получить уравнения для расчета критических свойств всего гомологического ряда, если известны значения критических констант одного гомолога.

Ранее с помощью метода функциональной автомодельности были получены уравнения для расчета критической температуры и критического давления веществ, молекулы которых имеют цепное строение [1].

В настоящей работе предложено уравнение для расчета критической плотности гомологических рядов:

$$\rho_C(n) = \left[\rho_C(k)^{1-\beta} + c^{-\beta}(\beta - 1)(n-k) \right]^{\frac{1}{1-\beta}}, \qquad (1)$$

Здесь n - число повторяющихся звеньев в молекуле, c и β - параметры, зависящие от строения основного звена. Для гомологических рядов с общей формулой $R1(CH_2)_nR2$, где R1 и R2 – концевые группы, параметры c и β одинаковые и рассчитываются путем совместной обработки экспериментальных данных. Проведенные ранее исследования поведения критических свойств соединений, состоящих из цепных молекул, показали, что при $n\to\infty$ $\rho_c \sim n^{-0.5}$. Таким образом в ур. (1) параметр $\beta = 3$.

В докладе будут представлены результаты расчетов критической температуры, критического давления, критической плотности гомологических рядов с общей формулой $R1(CH_2)_nR2$. Коэффициенты уравнений были рассчитаны с использованием существующей на данный момент экспериментальной базы данных. Определено значение предельной критической температуры для веществ со строением основного звена CH_2 (при $n\to\infty$): $T_c^{\infty} = 1397$ K.

Результаты расчетов критических параметров 16 гомологических рядов предложенным методом сравнивались с экспериментальными данными и значениями критических параметров, рассчитанными методами Константину и Гани, Марреро и Гани и Хуккерикар и др. [2, 3, 4].

Работа выполнена при поддержке РНФ, проект N 19-19-00115.

Список литературы

1. **Nikitin E.D., Pavlov P.A., Bogatishcheva N.S.** // Fluid Phase Equilib. 2005. Vol.235. P.1-6.
2. **L. Constantinou, R. Gani** // AIChE J. 1994. Vol. 40. P.1697–1710.
3. **J. Marrero, R. Gani** // Fluid Phase Equilib. 2001. Vol. 183–184. P. 183–208.
4. **A.S. Hukkerikar, B. Sarup, A.T. Kate, J. Abildskov, G. Sin, R. Gani** // Fluid Phase Equilib. 2012. Vol. 521. P. 25–43.

N.S. Bogatishcheva, E.D. Nikitin

Institute of Thermal Physics, UrB of RAS,
Russia 620016 Ekaterinburg, Amundsen Str., 107A

USING THE METHOD OF SELF-SIMILAR FUNCTIONS FOR ESTIMATING THE CRITICAL PROPERTIES OF HOMOLOGOUS SERIES

УДК 536.712

К.Р. Проценко, В.Г. Байдаков

ФГБУН Институт теплофизики УрО РАН,
Екатеринбург, 620016, Амундсена, 107а

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАВИТАЦИИ В РАСТЯНУТОЙ ЖИДКОСТИ

Жидкости, как и твердые тела, способны выдерживать растягивающие напряжения. Граница предельной прочности жидкой фазы на разрыв (спинодаль) определяется теорией термодинамической устойчивости.

Сохраняя восстановительную реакцию на бесконечно малые возмущения, растянутая жидкость проявляет неустойчивость при появлении в ней кавитационных полостей – зародышей новой фазы, размеры которых превышают критический. В отсутствии готовых и легкоактивируемых центров фазового превращения, зародыши формируются термофлуктуационным путем. Этот процесс описывается классической теорией нуклеации. Основная кинетическая характеристика кавитационного распада – частота нуклеации, число жизнеспособных зародышей новой фазы, образующихся в единице объема системы в единицу времени J.

Кавитация в растянутых простых жидкостях исследовалась как экспериментально [1,2], так и методами компьютерного моделирования [3]. В натурных экспериментах возможна реализация состояний с частотами кавитации достигают 10^{27} $с^{-1}м^{-3}$ [2]. Продвижение в область более высоких частот требует разработки новых методов исследования. В то же время традиционные методы молекулярно-динамического моделирования метастабильного распада, например, метод среднего времени жизни [3] ограничены по J снизу значением 10^{31} $с^{-1}м^{-3}$. Заход в область низких частот связан со значительными затратами вычислительных ресурсов.

Мы использовали методы моделирования редких событий, а именно метод выборки прямого потока и внедрения зародыша новой фазы, что позволило получить частоты нуклеации в интервалах от 10^{21} до 10^{31} $с^{-1}м^{-3}$ и от 10^{-140} до 10^{30} $с^{-1}м^{-3}$, соответственно.

Исследовалась кавитация в леннард-джонсовской жидкости на трех изотермах, соответствующих температурам T=0.5, 0.8 и 1.0 (здесь и далее все величины приводятся в безразмерном виде, в качестве параметров приведения используются параметры потенциала Леннард-Джонса). Молекулярно-динамические модели содержали от 5000 до 100000 частиц. Радиус обрезания потенциала принимался равным 6.58. Моделирование проводилось в *NVT* ансамбле.

Полученные при МД моделировании значения J превышают рассчитанные из классической теории зародышеобразования в макроскопическом приближении. Чем ниже температура, тем больше данное рассогласование. При T=0.5 расхождение между данными моделирования и теории достигает 16 порядков. С приближением к линии равновесия рассогласование минимально.

Полученные данные позволили рассчитать поверхностную свободную энергию критических зародышей и проанализировать ее зависимость от кривизны межфазной границы (Рис. 1).

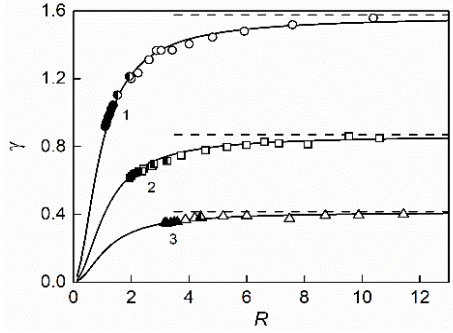


Рис. 1. Поверхностная свободная энергия критических пузырьков как функция радиуса их поверхности натяжения при (1) T=0.5, (2) 0.8, (3) 1.0. Открытые точки - результаты метода внедрения, частично закрашенные – выборки прямого потока, закрашенные - среднего времени жизни. Сплошные линии - аппроксимация МД данных.

Список литературы

1. **Pettersen M.S., Balibar S., Maris H.J.** Experimental investigation of cavitation in superfluid ^{4}He // Phys.Rev.B 1994. V. 49, 12062.
2. **Vinogradov V.E., Pavlov P.A., BaidakovV.G.** Cavitation strength of an argon-helium solution // Chem.Phys.Lett. 2009. V.474, P. 294.
3. **Baidakov V.G., Bobrov K.S.** Spontaneous cavitation in a Lennard-Jones liquid at negative pressures // J.Chem.Phys. 2014. V.140, 184506.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-48-660027 р_а).

K.R. Protsenko, V.G. Baidakov

Institute of Thermophysics UB RAS,
Russia, Yekaterinburg, 620016, str. Amundsen, 107a

MOLECULAR DYNAMIC SIMULATION OF CAVITATION IN A STRETCHED LIQUID

УДК 539.234, 539.213, 539.264

А.С. Томин[1], *М.З. Файзуллин*[1], *А.В. Виноградов*[1], *В.П. Коверда*[1], *А.Ю. Манаков*[2]

[1] Институт теплофизики УрО РАН,
620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 107а
[2] Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН,
630090, Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 3

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ СЛОЯХ АМОРФНОГО ЛЬДА

Аморфные твердые слои низкомолекулярных веществ можно получить осаждением молекулярных пучков на охлажденную поверхность. При низких температурах устойчивость таких конденсатов, которые представляют собой глубоко переохлажденную замороженную жидкость, обеспечивается высокой вязкостью и малой величиной частоты зародышеобразования кристаллической фазы. При нагревании аморфные конденсаты кристаллизуются путем зарождения и роста кристаллических центров. В отличие от случая малых переохлаждений в глубоко переохлажденных жидкостях процесс кристаллизации аморфных слоев может сам себя интенсифицировать за счет положительной обратной связи между скоростью выделения тепла и уменьшением вязкости. При кристаллизации твердых аморфных водно-газовых конденсатов образуются газовые гидраты (ГГ). В условиях глубокой метастабильности реализуется спонтанный режим кристаллизации, который обеспечивает захват молекул газа без их вытеснения движением фронта кристаллизации [1].

Слои аморфного льда, насыщенные газом, получали осаждением дозвуковых (дозвуковое осаждение) и сверхзвуковых (сверхзвуковое осаждение) потоков разреженного водяного пара и газа (CH_4, C_2H_6, C_3H_8 и CO_2) в вакууме на охлаждаемую жидким азотом подложку.

Для наблюдения за образцами использовался емкостный датчик, который позволял определять температуры стеклования и кристаллизации по изменению диэлектрических свойств конденсатов при нагревании. Тепловые эффекты, связанные с превращениями, регистрировались с использованием дифференциального термического анализа [2].

Методом рентгеновской порошковой дифракции с использованием источника синхротронного излучения выполнены структурные исследования газонасыщенных слоев аморфного льда. Опыты с образцами, насыщенными CH_4, C_3H_8 и CO_2, показали присутствие гидратных структур, образующихся при спонтанной кристаллизации газонасыщенных конденсатов.

Список литературы

1. **Файзуллин М.З., Виноградов А.В., Томин А.С., Коверда В.П.** Нестационарная нуклеация в слоях аморфного льда в присутствии искусственно внесенных кристаллических центров // Доклады Академии Наук. 2017. Т. 472. № 6. С. 645-649.
2. **Faizullin M.Z., Vinogradov A.V., Koverda V.P.** Formation of clathrate hydrates under crystallization of gas-saturated amorphous ice // Int. Journal of Heat and Mass Transfer. 2013. V. 65, P. 649–654.

A.S. Tomin[1], *M.Z. Faizullin*[1], *A.V. Vinogradov*[1], *V.P. Koverda*[1], *A.Y. Manakov*[2]

[1] Institute of Thermal Physics UB RAS,
620016, Ekaterinburg, Amundsen, 107a
[2] Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry SB RAS,
630090, Novosibirsk, Ac. Lavrentiev, 3

INVESTIGATION OF CRYSTALLIZATION IN GAS-SATURATED LAYERS OF AMORPHOUS ICE

УДК 536.2

Н.С. Богатищева, Д.А. Галкин

Институт теплофизики УрО РАН,
Екатеринбург, 620016, Амундсена, 107а [•]

КОЭФФИЦИЕНТЫ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВОДНОГО РАСТВОРА МОНОБУТИЛОВОГО ЭФИРА ЭТИЛЕНГЛИКОЛЯ

Выполнены измерения коэффициентов температуропроводности и теплопроводности водного раствора монобутилового эфира этиленгликоля (МБЭЭГ). Выбранная в качестве объекта исследования система характеризуется наличием НКТР и ВКТР и имеет замкнутую область несовместимости компонентов.

Измерения коэффициента температуропроводности были выполнены методом лазерной вспышки с помощью установки LFA-457 MicroFlash Netzsch. Для работы с жидкими соединениями были изготовлены контейнеры из нержавеющей стали, каждый из которых представляет собой цилиндрическую емкость с тонким дном и углублением в центре крышки. В эксперименте использовались два контейнера с разной толщиной слоя исследуемого вещества: 0.33 мм и 0.4 мм. Более подробно методика измерения коэффициентов температуропроводности жидкостей изложена в статье [1]. По нашим оценкам погрешность измерений для жидких соединений не превышает 5 %.

Для измерения коэффициента теплопроводности использовалась установка [2, 3], реализующая метод нестационарного нагрева проволочного зонда. Одним из основных условий данного метода является поддержание постоянной плотности теплового потока, данное требование эквивалентно поддержанию постоянства мощности на нагревателе-зонде в ходе импульса нагрева. В ходе эксперимента на платиновый нагреватель-зонд длиной 5 см подается импульс длительностью 2 секунды, за это время исследуемый образец нагревается на 3 градуса. Данный температурный напор был выбран для уменьшения влияния конвекции.

Измерения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности системы МБЭЭГ / вода выполнены при атмосферном давлении в диапазоне значений температуры от комнатной до температуры фазового разделения по механизму жидкость-жидкость в полном диапазоне концентраций. Достижение данной температуры определялось по отклонению температурной зависимости коэффициента теплопроводности от линейной. Таким образом, была сделана оценка положе-

[•] Н.С. Богатищева, Bogatishcheva@mail.ru,

ния нижней ветви бинодали системы на диаграмме температура / концентрация.

В эксперименте использовался образец МБЭЭГ производства фирмы Merc с чистотой не менее 99%. Растворы изготавливались на основе бидистиллированной воды.

Для монобутилового эфира этиленгликоля были получены уравнения для расчета коэффициентов теплопроводности и температуропроводности в исследованном температурном диапазоне.

Полученные результаты измерения для чистых компонентов раствора сравнивались с имеющимися литературными данными и со значениями, рассчитанными с помощью современных методов группового вклада [4].

Работа выполнена при поддержке РНФ, проект N 19-19-00115.

Список литературы

1. **Богатищева Н.С., Файзуллин М.З., Никитин Е.Д.** Теплоемкость и температуропроводность этиловых эфиров н-алкановых кислот – компонентов биодизельного топлива // Журнал Физ. Химии. 2017. Т. 91. № 9. С. 1484-1490.
2. **S.B. Rutin, D.A. Galkin, P.V. Skripov.** Returning to classic conditions of THW-technique: A device for theconstant heating power mode // Int. J. Heat Mass Transfer. 2017. Vol. 115, P. 769-773.
3. **S.B. Rutin, D.A. Galkin, P.V. Skripov.** Comments on ‘‘Low cost and new design of transient hot-wire techniquefor the thermal conductivity measurement of fluids” (Appl. Therm. Eng.105 (2016) 142) // Applied Thermal Engineering. 2018. Vol. **129**, P.145 – 147.
4. **Govender O., Rarey J., Ramjugernath D.** Estimation of Pure Component Properties, Part 5: Estimation of theThermal Conductivity of Nonelectrolyte Organic Liquids via Group Contributions // J. Chem. Eng. Data. 2020. Vol. 65, P. 1300-1312.

N.S. Bogatishcheva, D.A. Galkin

Institute of Thermal Physics, UrB of RAS,
Russia 620016 Ekaterinburg, Amundsen Str., 107A

THERMAL DIFFUSIVITIES AND THERMAL CONDUCTIVITIES OF AQUEOUS SOLUTION OF ETHYLENE GLYCOL MONOBUTYL ETHER

СЕКЦИЯ 3

Тепло- и массообмен в двухфазной и многофазной средах

УДК 536.248.2

А.Н. Павленко

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
Новосибирск, 630090, просп. Академика Лаврентьева, 1 [•]

ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИИ МЕТОДОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА И ПОВЫШЕНИЯ КРИТИЧЕСКОГО ТЕПЛОВОГО ПОТОКА ПРИ КИПЕНИИ

В лекции представлен анализ современных достижений, перспектив и критических проблем в разработке методов интенсификации теплообмена и повышения критического теплового потока при кипении и испарении в различных гидродинамических условиях (в условиях свободной конвекции; при пленочных течениях жидкости, включая орошение пакетов труб; в тонких горизонтальных слоях жидкости), в том числе, при нестационарных режимах тепловыделения и охлаждения сильно перегретых тел. В настоящее время наблюдается значительный рост исследований в данной области науки, что обусловлено высокой практической значимостью результатов этих исследований для целого ряда традиционных и новых приложений, а также новыми возможностями/успехами в материаловедении и в развитии современной экспериментальной техники. В рамках данного обсуждения проводится анализ ряда новейших результатов, полученных различными методами модифицирования теплоотдающей поверхности (капиллярно-пористые покрытия, создаваемые плазменным методом, методом 3D-печати; металлические пены, композитные пористые поверхности и структуры; структуры, организуемые методами микродугового оксидирования, микродеформируемого резания; сетчатые покрытия; покрытия с контрастной смачиваемостью; электрохимические методы осаждения и создания покрытий; комбинированные методы).

В первом разделе анализируются возможные физические механизмы и факторы, ответственные за интенсификацию теплообмена при пузырьковом кипении в условиях свободной конвекции, в зависимости от степени приближения к критическому тепловому потоку и типа жидкости. Обсуждаются вопросы специфики разработки методов увеличения критического теплового потока с одновременной возможностью увеличения и коэффициента теплоотдачи при пузырьковом кипении. Отмечается, что уровень современного состояния в области теоретических исследований, численного моделирования и достигнутые здесь возможности пока не позволяют расчетным результатам и вытекающим из них рекомендациям быть эффективным и достаточным инструментом для поиска и выбора наиболее оптимальных параметров микронаномодификации теплообменных по-

[•]А.Н. Павленко, pavl@itp.nsc.ru

верхностей при кипении для различных типов жидкостей заданной чистоты с учетом материала стенки, масштабного фактора и геометрии тепловыделяющих сборок, изменения приведенного давления в заданном диапазоне. В докладе представлены результаты сравнения новых экспериментальных данных по эффективности теплообмена и критическому тепловому потоку при кипении в условиях большого объема разных жидкостей при различных законах тепловыделения на новых микроструктурированных капиллярно-пористых покрытиях, полученных методами направленного плазменного напыления и 3D-печати, на поверхностях, модифицированных электрохимическим методом, припаиванием пенного слоя или другими методами. Рассмотрены результаты анализа влияния гидрофобных/гидрофильных покрытий на интенсивность процессов теплообмена при кипении.

Во второй части доклада проводится сравнительный анализ по эффективности теплообмена и критическому тепловому потоку при пленочных течениях жидкостей и их смесей по вертикальным цилиндрам и горизонтальным трубам с горизонтальной, ромбовидной микротекстурами, искусственной шероховатостью, покрытиями nanoFLUX, LbL и с другими коммерческими поверхностями, со структурами, полученными деформируемым резанием (МДР), методом микродугового оксидирования (МДО), с сетчатыми покрытиями различных форм. Рассмотрены особенности механизмов интенсификации теплообмена и увеличения критического теплового потока в стекающих пленках жидкости по сравнению с кипением в условиях большого объема. Представлен краткий анализ результатов экспериментальных и теоретических исследований по нестационарному охлаждению сильно перегретых тел с новыми структурированными капиллярно-пористыми или низкотеплопроводными покрытиями стекающими пленками жидкости.

Исследование выполнено за счёт гранта РНФ (проект № 19-19-00180: блок исследований с использованием покрытий, создаваемых методом 3D-печати); блок по интенсификации теплообмена плазменным методом выполнен в рамках государственного задания ИТ СО РАН ***(****№ 121031800216-1****),*** *блок по теплообмену с использованием микродугового оксидирования выполнен за счет гранта Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2020-770).*

A.N. Pavlenko

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

TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF METHODS FOR HEAT TRANSFER ENHANCEMENT AND INCREASING THE CRITICAL HEAT FLUX DURING BOILING

УДК 621.9

А.С. Дмитриев

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

НЕТРИВИАЛЬНАЯ КАПИЛЛЯРНАЯ ГИДРОДИНАМИКА И СИЛЬНОЕ ИСПАРИТЕЛЬНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ В МНОГОСЛОЙНЫХ ДВУМЕРНЫХ МАТЕРИАЛАХ: ПРИМЕНЕНИЕ В СИСТЕМАХ ТЕРМОМЕНЕДЖМЕНТА ЭЛЕКТРОННЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Проблемы термостабилизации и термоменеджмента различных энергетических (топливные ячейки, солнечные фотопанели, солнечная теплоэнергетика и т.д.) и электронных (процессоры, нанотранзисторы, полупроводниковые микро- и нанолазеры и т.п.) устройств не могут быть решены (в частности, «тепловая стена» закона Мура) без использования более радикальных способов охлаждения, чем применяются в настоящее время [1-3]. На сегодня считается, что самым эффективным способом охлаждения является фазовый переход жидкость-пар, когда используется скрытая теплота испарения. Однако, лимитирующим фактором такого процесса является скорость подвода жидкости к межфазной границе [3]. Совсем недавно было обнаружено, что использование слоистых 2D материалов (графен, дисульфид молибдена и т.д.) приводит к нетривиальной капиллярной гидродинамики в наноразмерных порах и каналах [4,5], что позволяет резко увеличить скорость подвода охлаждающей испаряющейся жидкости к межфазной границе, практически снимая лимитирующий фактор скорости течения жидкости.

В данной работе приводятся современные данные по капиллярной термогидродинамике нанопор и наноканалов, рассматриваются механизмы сильного испарительного охлаждения с использованием двумерных материалов, приводятся примеры использования подобных подходов к перспективному термоменеджменту. В природных явлениях сильное испарительное охлаждение встречается весьма часто, поэтому многие механизмы капиллярной термогидродинамики и сильного испарения можно «подсмотреть» у природы, что только в последние годы стало очевидным фактом.

Нанопористая структура весьма трудно реализуема в обычных материалах, однако возможность ее создания непосредственно связана с двумерными материалами (в несколько атомных слоев), что в настоящее время может быть осуществлено, например, с использованием графеновых нанохлопьев (толщина 2-4 нм, латеральный размер – от 20 до 100 мкм) при изготовлении объемных структур. Важно, что в таких структурах поперечный размер наноканалов может составлять величин

от 2 до 8-10 нм, что, естественно, приводит к аномально высокой скорости движения воды, как показывают прямые эксперименты с графеновыми наномембранами и наши эксперименты по испарению из таких структур под действием солнечного излучения [2,6].

Помимо традиционных моделей описания капиллярной термогидродинамики с межфазной границей, в некоторых задачах появляются новые физические эффекты – учет скольжения жидкой фазы вблизи границы, особенности смачивания поверхности с наношероховатостями, электроосмотические, термоосмотические течения и термофорез [6].

В последнее время нами также исследованы неоднородные поверхности, состоящие из слоев различной пористости (нанопоры и наноканалы, как вертикальные, так и горизонтальные, а также микросетки), в частности для управления пленочным кипением капель (эффект Лейденфроста). Показано, что различные масштабные структуры на поверхности способны изменять базовые параметры этого эффекта, в частности, как повышать, так и снижать температуру Лейденфроста, что важно для термостабилизации поверхностей при использовании испарительного или капельного охлаждения.

Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 17-19-01757).

Список литературы

1. **Дмитриев А.С.** Введение в нанотеплофизику. М.: БИНОМ, 2015. 756 с.
2. **Dmitriev A.** (2019). Hybrid Graphene Nanocomposites: Thermal Interface Materials and Functional Energy Materials. 10.5772/intechopen.89631.
3. **Singh H. and Myong R.** Critical Review of Fluid Flow Physics at Micro- to Nanoscale Porous Media Applications in the Energy Sector. Hindawi Advances in Materials Science and Engineering. Volume 2018, 9565240, 31 pages.
4. **Zhu Y., Zhan K. and Hou X.** Interface Design of Nanochannels for Energy Utilization. ACS Nano 2018, 12, 2, 908–911.
5. **Sadaghiani A., Motezakker A., Kasap S. et al.** Foamlike 3D Graphene Coatings for Cooling Systems Involving Phase Change. ACS Omega 2018, 3, 2804−2811.
6. **W. Lei, M. Rigozzi and D. McKenzie.** The physics of confined flow and its application to water leaks, water permeation and water nanoflows: a review. Rep. Prog. Phys. 79 (2016) 025901 (45pp).

A.S. Dmitriev

National Research University “MPEI”
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya, 14

NONTRIVIAL CAPILLARY HYDRODYNAMICS AND STRONG EVAPORATIVE COOLING IN MULTILAYER TWO-DIMENSIONAL MATERIALS: APPLICATION IN THERMAL MANAGEMENT OF ELECTRONIC AND POWER DEVICES

УДК 536.24: 532.529

А.Ю. Бабич, Э.Р. Зайнуллина, В.Ю. Митяков, С.З. Сапожников

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

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНДЕНСАЦИИ ВОДЯНОГО ПАРА НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРУБ МЕТОДОМ ГРАДИЕНТНОЙ ТЕПЛОМЕТРИИ

Классическим методом для измерения теплообмена в трубах при конденсации является термометрия, однако она обладает рядом недостатков. В представленном исследовании используются гетерогенные градиентные датчики теплового потока (ГГДТП) [1]. Разработана и собрана экспериментальная установка, которая позволяет задавать различные направления для пара и охлаждающей воды, а также наклонять и поворачивать экспериментальный участок.

Теплоносителями служили насыщенный водяной пар с температурой, близкой к 100 ^{0}C, и вода из водопровода с температурой 22 ^{0}C. Для наклонной трубы построены распределения коэффициентов теплоотдачи по внутренней поверхности (рис. 1).

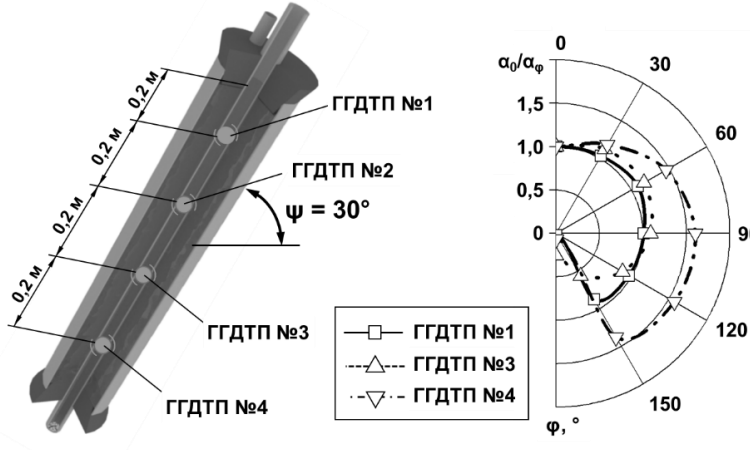


Рис. 1. Распределение коэффициента теплоотдачи по внутренней поверхности наклонной трубы.

При подаче пара снизу (моделировалась обратная конденсация) градиентная теплометрия позволила выявить режимы течения пара и конденсата.

Сравнением с данными литературы [2] подтверждена адекватность предложенного подхода. Достигнутый в эксперименте метрологический уровень (относительная неопределенность не превысила 10%) делает результаты доказательными и подтверждает применимость градиентной теплометрии при исследовании конденсации на внутренней поверхности труб.

Список литературы

1. **Sergey Z. Sapozhnikov, Vladimir Yu. Mityakov, Andrey V. Mityakov**// Heatmetry The Science and Practice of Heat Flux Measurement// Springer International Publishing, 2020. – 209 с.
2. **Лабунцов Д.А.** Физические основы энергетики. Избранные труды по теплообмену, гидродинамике, термодинамике. — М.: Издательство МЭИ, 2000. — 388 с.

A.Yu. Babich, E.R. Zainullina, V.Yu. Mityakov, S.Z. Sapozhnikov

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

STUDY OF STEAM CONDENSATION AT THE INNER TUBE SURFACE WITH GRADIENT HEATMETRY

УДК 621.9

С.С. Кропотова[1], *П.А. Стрижак*[1], *Н.Е. Шлегель*[1]

[1] Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, 634050, Ленина, 30 (•)

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ЖИДКОСТИ НА РЕЖИМЫ И ПОСЛЕДСТВИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ КАПЕЛЬ

Процессы соударений капель жидкости в газовой среде распространены в различных отраслях [1, 2]: топливные технологии, теплообменное оборудование, пожаротушение, и др. Соударения капель в аэрозольном потоке приводят к изменениям распределений капель по размерам. Полученные в результате дробления исходных капель вторичные фрагменты способны существенно увеличить площадь свободной поверхности образующихся капель, необходимой для покрытия зоны возгорания и последующего подавления горения. Целью работы являлось экспериментальное определение характеристик измельчения капель перспективных огнетушащих жидкостных составов (в виде растворов, суспензий, эмульсий).

Для проведения экспериментальных исследований использовался комплекс с системой подачи одиночных капель (аналогично методике, рассмотренной в [3]). Исследовались наиболее перспективные в области пожаротушения составы (вода, графитовая суспензия, суспензия бентонита, раствор бишофита, эмульсии (пенообразователи, ПАВ Twen 80 и Сульфат NA)). Выделены основные режимы взаимодействия капель: отскок, разлет, дробление, коагуляция.

Полученные в результате экспериментальных исследований данные позволяют достоверно прогнозировать переход к интенсивному дроблению всех исследованных составов огнетушащих жидкостей за счет варьирования одного из трех параметров: размеров, скоростей движения, углов атаки. Установлено, что существенную роль играет относительная скорость движения капель. Этот параметр, главным образом, определяет кинетическую энергию последних, как перемещающихся объектов. Далее по данному параметру располагается угол взаимодействия. Например, дробление практически во всем диапазоне чисел Вебера We происходило в основном при углах столкновения от $\pi/3$ до $\pi/2$, а коагуляция при малых углах, т.е. менее $\pi/9$. Отскок определялся скоростью движения капель и мог происходить при любых углах столкновения капель. Чаще всего мелкая капля, движущаяся с большой скоростью, проходила через крупную с сохранением размеров обеих капель. Для дробления в таком случае требовались скорости полета выше 2–3 м/с.

(•) С.С. Кропотова, SkralinovaS@yandex.ru

Наиболее важным результатом проведенных экспериментов являются установленные условия кратного роста числа мелких фрагментов перспективных огнетушащих составов за счет процессов соударений капель. На рис. 1 приведены результаты вычисления количества и размеров, а также суммарной площади свободной поверхности образующихся капель при соударениях исходных.

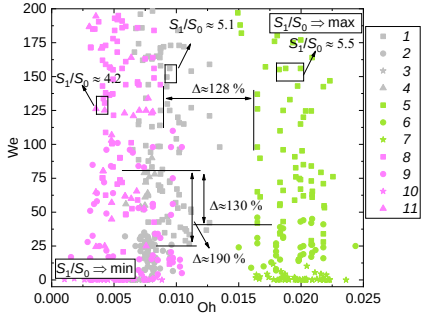


Рис. 1. Условия максимального измельчения капель огнетушащих составов в виде карты режимов соударений, учитывающей соотношения сил инерции, вязкости и поверхностного натяжения: *1-4* – суспензия (5 % бентонит, 95 % вода); *5-7* – эмульсия (5 % пенообразователь, 95 % вода); *8-11* – вода; *1*, *5*, *8* – дробление; *2*, *6*, *9* – коагуляция; *3*, *7*, *10* – отскок; *4*, *11* – разлет.

Рисунок 1 с точки зрения практической значимости результатов исследований имеет особую важность. На нем показаны условия и составы, для которых обеспечивается максимальное измельчение капель за счет их соударений (указаны диапазоны чисел Вебера и Онезорге, при которых отношение суммарной площади свободной поверхности перед соударением к суммарной площади поверхности после соударения $S_1/S_0 \rightarrow 2–6$).

Работа поддержана Российским научным фондом (проект 18–71–10002).

Список литературы

1. **Taskiran O.O., Ergeneman M.** Trajectory based droplet collision model for spray modeling // Fuel. 2014. V. 115. P. 896–900.
2. **Vysokomornaya O.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A**. Experimental investigation of atomized water droplet initial parameters influence on evaporation intensity in flaming combustion zone // Fire Saf. J. 2014. V. 70. P. 61–70.
3. **Antonov D.V., Shlegel N.E., Strizhak P.A., Tarlet D., Bellettre J.** Energy analysis of secondary droplet atomization schemes //International Communications in Heat and Mass Transfer. 2020. V. 117, 104666.

S.S. Kropotova, P.A. Strizhak, N.E. Shlegel

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

INFLUENCE OF LIQUID PROPERTIES ON MODES AND OUTCOMES OF DROPLET COLLISIONS

УДК 533.6.011.6

С.С. Попович[1], *А.Г. Здитовец*[1], *Н.А. Киселев*[1], *Ю.А. Виноградов*[1]

[1] НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова,
Москва, 119192, Мичуринский проспект, 1 (•)

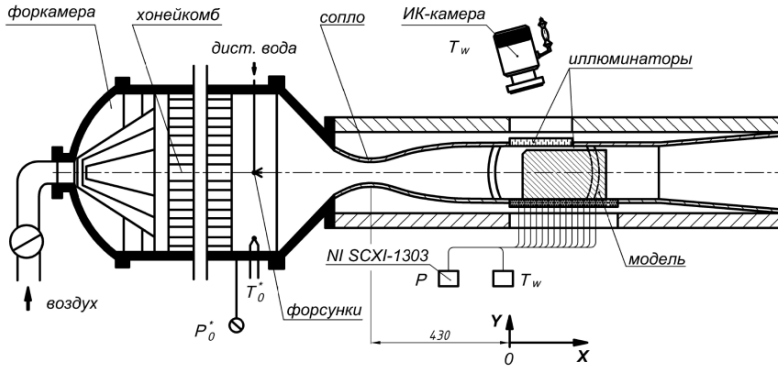
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОГАЗОДИНАМИКИ СВЕРХЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ СТЕНКИ ГАЗО-КАПЕЛЬНЫМ ПОТОКОМ

Исследованию взаимодействия двухфазных (дисперсных) потоков с обтекаемыми телами посвящено множество работ (см., например, обзор [1]). Наличие даже небольшого количества примеси (доли процента) в основном потоке может приводить к существенным изменениям его параметров на поверхности обтекаемого тела. В данной работе внимание сконцентрировано на влиянии примеси водных капель в сверхзвуковом воздушном потоке на температуру поверхности обтекаемого тела, а также на возможности аэродинамической фокусировки частиц на стенку при организации в потоке скачков уплотнения малой интенсивности. Снижение температуры обтекаемой стенки в этом случае может позволить значительно повысить эффективность методов тепловой защиты, устройств безмашинного энергоразделения [2], способов интенсификации теплообмена и других.

В работе представлены результаты сравнительного исследования обтекания пластины сверхзвуковым воздушным и воздушно-капельным потоками. Экспериментальные исследования проводились на сверхзвуковом аэродинамическом стенде АР-2 (рис. 1) с использованием систем регистрации данных National Instruments, автоматизированных программ опроса и обработки показаний сенсорных устройств в среде LabView, термопар с термокомпенсацией, зондовых измерений, тепловизора и методов визуализации лазерным ножом и с помощью масло-сажевого покрытия.

Проведена серия экспериментальных измерений темпа охлаждения модели и распределения адиабатной температуры стенки, обтекаемой сверхзвуковым воздушным и воздушно-капельным потоком [3]. Числа Маха набегающего потока варьировались в диапазоне от 2.0 до 3.0. Относительный массовый расход жидкости (массовая концентрация) составлял до 0.5%. Жидкость (дистиллированная вода) распылялась через каскад центробежных форсунок мелкодисперсного распыла в воздушный поток в форкамере.

(•) С.С. Попович, pss@imec.msu.ru



T_0^* – полная температура набегающего потока; P_0^* – полное давление в форкамере; P – статическое давление на стенке; T_w – температура модели

Рис. 1. Схема проведения эксперимента на сверхзвуковой аэродинамической установке АР-2

Работа выполняется в рамках госбюджетной темы АААА-А16-116021110200-5 НИИ механики МГУ.

Список литературы

1. **Вараксин А.Ю.** Обтекание тел дисперсными газовыми потоками (обзор) // ТВТ. 2018. Т. 56. № 2. С. 282-305.
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 // Exp. Therm. Fluid Sci. 2017. N. 88. P. 202–219.
3. **Попович С.С., Здитовец А.Г., Киселёв Н.А., Виноградов Ю.А., Медвецкая Н.В.** Измерение адиабатной температуры стенки плоской пластины, обтекаемой сверхзвуковым воздушно-капельным потоком // Изв. РАН. МЖГ. 2020. № 5. С. 130–136.

S.S. Popovich [1], A.G. Zditovets [1], N.A. Kiselev [1], Y.A. Vinogradov [1]

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

THERMAL GAS DYNAMICS RESEARCH OF SUPERSONIC GAS-DROPLET FLOW AROUND A WALL

УДК 532.5

Р.М. Федоренко, Д.В. Антонов, П.А. Стрижак

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, Томск, пр. Ленина, 30 (•)

ВЛИЯНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭМУЛЬГИРОВАННЫХ ТОПЛИВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВТОРИЧНЫХ КАПЕЛЬ ПРИ МИКРО-ВЗРЫВНОЙ ФРАГМЕНТАЦИИ

Введение. Процессы микро-взрывного измельчения капель эмульгированных топлив приводят к снижению инерционности прогрева, испарения и зажигания топливных композиций, повышению полноты их выгорания, уменьшению расхода топлива, а также его равномерному распылению [1]. Получение вторичных капель определенных размеров и скоростей позволит достичь оптимальных режимов работы технологического оборудования, однако необходимые для этого условия остаются малоизученными.

В настоящей работе приведены результаты экспериментального исследования процессов распада капель эмульсий в процессе нагрева, основное внимание уделено исследованию влияния вязкости, поверхностного и межфазного натяжения на характеристики вторичных капель, образующихся в результате микро-взрывной фрагментации капель эмульсий.

Методика экспериментальных исследований. Методика проведения экспериментов по регистрации характеристик и последствий микро-взрывной фрагментации капель эмульсий аналогична использованной в [2]. В настоящей работе основное внимание уделено регистрации последствий процессов распада капель эмульсий. В качестве компонентов эмульсий использовались вода и дизельное топливо. Характеристики вторичных капель представлены в виде распределений $N(r_d)$.

Результаты и обсуждения. Увеличение вязкости эмульсии ведет к росту времени задержки распада, вследствие чего растут градиенты температуры и давления в капле. Это приводит к ее более интенсивному разрушению, сопровождающемуся ростом количества вторичных капель в целом, а иногда и снижению их среднего размера, соответственно. Однако результаты экспериментов демонстрируют, что увеличение вязкости способствует повышению интенсивности дробления лишь до определенного предела. Повышение вязкости капли эмульсии способствует не только увеличению энергии внутреннего трения кап-

(•) Р.М. Федоренко, vfedrm@gmail.com

ли, но также увеличению размеров вторичных капель, что является нежелательным эффектом при реализации микро-взрывного измельчения.

Результаты экспериментов по варьированию межфазного натяжения свидетельствуют о том, что добиться наибольшего количества вторичных капель можно при наименьшем межфазном натяжении, поскольку размер капелек воды дисперсной фазы в данном случае будет наименьшим. Соответственно, размеры образующихся фрагментов меньше.

Эксперименты по варьированию поверхностного натяжения показали, что добавление ПАВ в состав эмульсий не только снижает значение поверхностного натяжения, но и изменяет режим распада в связи с тем, что ПАВ стабилизирует эмульсию. В случае без ПАВ характерным режимом распад был микро-взрыв, с ПАВ – диспергирование. Этим объясняется меньший размер и большое количество вторичных капель при максимальном поверхностном натяжении (для состава без добавления ПАВ) по сравнению с составами с добавлением ПАВ, где идет закономерное укрупнение размеров вторичных капель и снижение их количества.

Заключение. По результатам проведенных исследований были установлены типичные распределения вторичных капель, иллюстрирующие влияние группы факторов: вязкость, поверхностное и межфазное натяжение, начальный размер капель. Создана информационная база данных для развития современных моделей распада неоднородных капель. Полученные результаты важны для развития существующих и создания новых газопарокапельных технологий.

Исследование выполнено при поддержке РНФ (проект 18-71-10002).

Список литературы

1. **Sazhin S.S.** Modelling of fuel droplet heating and evaporation: Recent results and unsolved problems // Fuel. 2017. V. 196. P. 69–101.
2. **Antonov D.V., Fedorenko R.M., Strizhak P.A.** Child droplets produced by micro-explosion and puffing of two-component droplets // Appl. Therm. Eng. 2020. V. 164. 114501.

R.M. Fedorenko, D.V. Antonov, P.A. Strizhak

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

INFLUENCE OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF EMULSED FUELS ON THE CHARACTERISTICS OF CHILD DROPLETS DURING MICRO-EXPLOSIVE FRAGMENTATION

УДК 536.24

А.С. Гавриш, Л.А. Герасименко, А.С. Гончар

[1] Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского”,
Украина, Киев, 03056, проспект Победы, 37 (•)

КОНДЕНСАЦИЯ ПРИ ИСТЕЧЕНИИ СРОКА ПРИМЕНЕНИЯ ВОДООТТАЛКИВАЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

Введение. Диапазон дисперсности размеров конденсационных образований зависит от теплофизических свойств жидкости, состояния поверхности и ряда других факторов. На форму конденсационных образований влияет их масса, условия контакта с поверхностью (контактный угол) и ее состояние. Форма удаляемых с поверхности образований может отличаться от сферической. При этом изменяется баланс сил поверхностного натяжения между жидкостью, паром и конденсационной поверхностью. Не достаточно изученным является стадия постепенного разрушения водоотталкивающего покрытия, и вследствие этого изменение характера прохождения механизма процесса и кривых конденсации.

О механизме процесса конденсации при истечении срока применения водоотталкивающих веществ. Чисто капельный режим конденсации характерен для теплоносителей со значениями краевых углов более 90^0. При углах контакта меньших 90^0 говорят о псевдо капельной конденсации. А при углах контакта, направляющихся к 0^0, речь идет о псевдо пленочной и пленочной конденсации. Все эти механизмы процесса можно наблюдать для случая постепенного разрушения водоотталкивающего покрытия. Если учесть, что для каждого конкретного процесса образования капель может иметь место явление гистерезиса, то о чисто капельной конденсации можно говорить только в том случае, если весь спектр контактных углов (равновесный статический, натекания и оттекания) превышают 90^0. Если равновесный контактный угол близок к 90^0, а один или оба динамических угла отклоняются в сторону уменьшения, то речь идет о капле подобных формированиях.

Такие данные по гистерезису контактного угла представлены на рис.1. Долговечность таких покрытий должна быть как можно большей. Однако на современном этапе гидрофобизирующие добавки в теплоноситель являются недостаточно долговечными. При их разрушении изменяются физико-химические характеристики и поверхности теплообмена и теплоносителя. Насколько существенным является это влияние, зависит от многих факторов, но их отражением является ско-

(•) А.С. Гавриш, andrew_gavrish@ukr.net

рость коррозии поверхности и краевой угол смачивания. В конечном итоге режим капельной конденсации переходит в пленочный. Следствием этого есть ухудшение технических характеристик теплообменного оборудования.

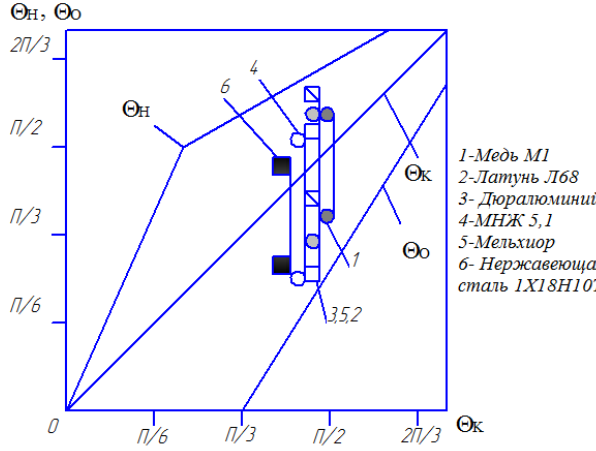


Рис. 1. Краевые углы смачивания для псевдо капельных и капле подобных конденсационных образований при истечении срока применения водоотталкивающих веществ, согласно экспериментам.

Заключение. Поверхностные свойства, обусловленные во многом способом гидрофобизации, проявляются с помощью краевого угла смачивания. Начальная стадия конденсации характеризуется ярко выраженной сферичностью капель. Чем выше сферичность конденсата, тем меньше площадь контакта с поверхностью и тем интенсивнее происходит движение по поверхности. Условия реализации смачивания зависят от материала и геометрии самой поверхности, а также, особенностей ее рельефа. Гидрофобизаторы нового поколения предназначены для защиты поверхностей от коррозионного воздействия воды, биокоррозии, агрессивных сред, таких как растворы солей, кислот и т.д. Применение нанопокрытий с заданной топологией, структурой и варьируемой гидрофобностью, позволит продлить срок эксплуатации теплообменного оборудования.

A.S. Gavrish, L.A. Gerasimenko, A.S. Gonchar

[1] National Technical University of Ukraine “Igor Sikorskiy Kyiv Polytechnic Institute”, Ukraine, 03056 Kyiv, Peremoga Prospect, 37

CONDENSATION AT APPLICATION TERM EXPIRATION OF WATER-REPELLENT SUBSTANCES

УДК 536-12

А.Р. Забиров, В.В. Ягов, М.А. Лексин

Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», 111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14

ВЛИЯНИЕ ПАВ НА НАЧАЛО ПРОЦЕССА ИНТЕНСИВОНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ В НЕДОГРЕТОЙ ВОДЕ

В статье Беккера [1] показано, что ПАВы с середины 90-х годов успешно применяются в металлургической промышленности Норвегии. Так, например, небольшое количество ПАВ добавляется в воду при производстве гранулированных сплавов меди и железа методом закалки расплавов.

Идея использования ПАВов для подавления парового взрывабыла превоначально предложена Грюнвельдом в его работе [2], а также в статьях Беккера с соавторами [1, 3]. Она основывается на возможности ПАВ стабилизировать паровую плёнку, которая окружает расплав, путём формирования слоя молекул ПАВ на границе раздела пар-жидкость. Беккер утверждает, что слой ПАВ на границе раздела снижает поверхностное натяжение, увеличивает поверхностную вязкость и поверхностную плотность охлаждающей жидкости и обеспечивает «жёсткую» поверхность на поверхности парового пузыря. На основании результатов Беккера небольшое количество ПАВ добавляется в воду, предназначенную для повторного залива активной зоны реакторов на лёгкой воде.

Основываясь на опыте предыдущих исследований [4-6] авторы данной статьи поставили цель оценить влияние концентрации водных растворов ПАВ на процесс интенсивного режима охлаждения в условиях недогрева.

В качестве образца в экспериментах использовался никелевый шар диаметром 40 мм, в котором было заложено 4 термопары (одна в центре и три на поверхности на полярных углах 90, 135и 180°). Процесс эксперимента заключался в следующем: рабочий образец с помощью индукционного нагрева разогревался до температуры 750 °С и затем опускался в охлаждающую жидкость заданной температуры. В качестве охлаждающей жидкости использовалась дистиллированная вода, а также водные растворы сульфанола (алкилбензолсульфанат) с концентрацией 0,1; 0,25; 0,5; 1 и 2 %. Зависимость поверхностного натяжения водного раствора сульфанола принималась по данным [7].

Однако так как эксперименты проводились на воздухе при атмосферном давлении в процессе многократного нагрева-охлаждения на поверхности никелевого шара образовалась оксидная плёнка. В резуль-

тате эффекты от состояния поверхности и концентрации ПАВ в охлаждающей жидкости, действующие в противоположные стороны, наложились друг на друга и выявить эффект от добавления ПАВ не представлялось возможным.

В дальнейшем для проведения экспериментов планируется производить полировку рабочего образца перед каждым режимом.

Работа проводится при поддержке гранта РНФ 20-79-10363.

Список литературы

1. **Becker K.M., Lindland, K.P.** The Effects of Surfactants on Hydrodynamic Fragmentation and Steam Explosions, KTH-NEL-50, Royal Institute of Technology,Stockholm, Sweden, 1991
2. **Groenveld P.** Explosive vapor Formation Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer, Vol 236, 1972
3. **Becker K.M., Engstrom J., MacBeth R.V.** Enhancement of Core DebrisCoolability KTH-NEL-51, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, May 1990
4. **Забиров А. Р., Лексин М. А., Ягов В. В.** Закономерности теплообмена в процессах закалки //Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. – 2015. – №. 1. – С. 51-59.
5. **Yagov V. V. et al.** Film boiling of subcooled liquids. Part I: Leidenfrost phenomenon and experimental results for subcooled water //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2016. – Т. 100. – С. 908-917.
6. **Лексин М. А. и др.** Исследование интенсивного охлаждения высокотемпературных тел в бинарной смеси вода–изопропанол //Теплофизика высоких температур. – 2020. – Т. 58. – №. 3. – С. 393-401.
7. **Янгиров Ф. Н. и др.** Исследование поверхностно-активных веществ, применяемых при бурении скважин //Научно-технический журнал «проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов». – 2018. – №. 1. – С. 61-68.

A.R. Zabirov, V.V. Yagov, M.A. Leksin

National research ubiversity “Moscow Power Engineering Institute”
Russia, 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya, 14

EFFECT OF SURFACTANT ON THE BEGINNING OF INTENSIVE COOLING REGIME IN SUBCOOLED WATER

УДК 621.9

С.З. Сапожников[1], *В.Ю. Митяков*[1], *А.В. Павлов*[1], *П.Г. Бобылев*[1], *М.Д. Виноградов*[1]

[1] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, 195251, Политехническая 29

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ В НАНОЖИДКОСТИ

Существующие методы интенсификации теплообмена при кипении позволяют не только снизить металлоемкость конструкций и увеличить отводимую плотность теплового потока (ПТП), но и подобрать оптимальные температурные параметры для энергоустановок. В работе рассматривается один из методов интенсификации теплообмена при кипении – использование в качестве рабочей жидкости взвеси Al_2O_3 при разных концентрациях.

Плотность теплового потока в экспериментах измерялась методом градиентной теплометрии. Методика основана на использовании гетерогенных градиентных датчиков теплового потока (ГГДТП) [1].

Экспериментальная модель – шар из титана ВТ22 диаметром D = 34 мм (рисунок 1). На поверхности шара установлен ГГДТП с размерами в плане 3×3 мм. Температура контролировалась двумя хромель-алюмелевыми термопарами. Одна установлена на поверхности вблизи датчика, а вторая в центре, для контроля равномерности прогрева модели перед экспериментом.

Измерена местная ПТП при остывании шара в воде и во взвеси частиц Al_2O_3 (температура шара T_w = 464 ^{o}C; температуре жидкости T_f = 64 ^{o}C). Массовая концентрация Al_2O_3 варьировалась от 0.32% до 4% [2, 3]. На рисунке 2 представлены кривые, соответствующие изменению местной ПТП при остывании модели в воде и во взвеси Al_2O_3 с массовой концентрацией 4%.

Как видно из рисунка 2, время пленочного и переходного режимов кипения сократилось, а максимальная (ПТП) выросла в 3 раза. Время полного остывания модели сократилось в 2 раза.

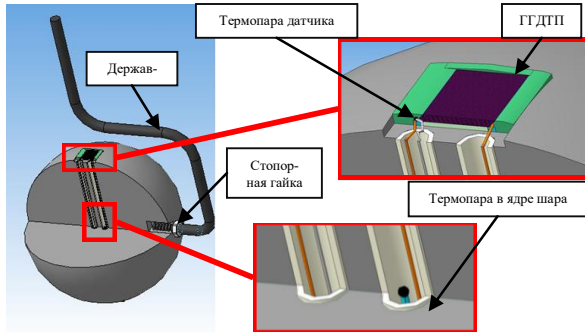


Рис. 1. Экспериментальная модель.

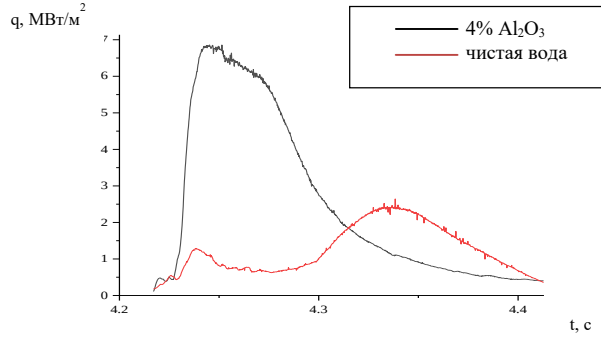


Рис. 2. Временные зависимости плотности теплового потока при остывании шара в воде и во взвеси частиц Al_2O_3.

Список литературы

1. **Sapozhnikov, S. Z.** / Heatmetry. The Science and Practice of Heat Flux Measurement / Sapozhnikov, S. Z. Mityakov, V. Yu., Mityakov, A. V. // St.-Petersburg, Springer International Publishing, 2020, 209 p, DOI: 10.1007/978-3-030-40854-1.
2. Теплообмен и гидродинамика в каналах сложной формы / Ю.И. Давыдов, Б.В. Дзюбенко, Г.А. Дрейцер и др. Под ред. В.М. Иевлева. М.: Машиностроение, 1986. 200 с.
3. **Суржиков С.Т.** Перенос излучением в неоднородных слоях // ТВТ. 1997. Т. 35. № 3. С. 5—8.

Sapoznikov S.Z.[1], *Mityakov V.Yu.*[1], *Pavlov A.V.*[1], *Bobylev P.G.*[1], *and Vinogradov M.D.*[1]

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University “SPbPU”, Saint Petersburg, 195251, Politekhniceskaya, 29

ENHANCEMENT OF HEAT TRANSFER FOR BOILING IN NANOFLUID

УДК 536.24

Д.П. Храмцов[1], *А.А. Мошин*[2], *Д.А. Некрасов*[2]

[1] ФГБОУ ВО "МИРЭА - Российский технологический университет",
Москва, 119454, пр. Вернадского, д. 78
[2] ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет»,
Москва, 107023, ул. Большая Семеновская, д.38

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРОВОЙ ФАЗЫ ПО СЕЧЕНИЮ КАНАЛА С ЗЕРНИСТОЙ ЗАСЫПКОЙ ПРИ КРИТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ ТЕЧЕНИЯ

Проведена серия вычислительных экспериментов по определению выходного паросодержания при различных материалах засыпки для исходных массовых паросодержаний 0.05 и 0.2, длинах рабочих участков 250 и 355 мм и диаметрах частиц засыпки 2 и 4 мм. Рассмотрены случаи недогрева засыпки ($\Delta T<0$), отсутствия недогрева ($\Delta T=0$) и наличия теплового потока между засыпкой и парожидкостной смесью (q_v).

Применение модели в трехмерной постановке позволило рассчитать распределение паросодержания по сечению канала на входе в рабочий участок, на расстоянии 100 мм от входа и на выходе из рабочего участка на расстоянии 355 мм (рис. 1). Сплошными линиями здесь показаны осредненные значения паросодержаний. В качестве базового (синие столбики) рассматривался случай недогрева шаровой засыпки, соответствующий эксперименту – 155 градусам [1]. Для сравнения рассмотрены также случаи, когда недогрев отсутствовал и в случае перегрева, предельный уровень которого составлял порядка 240 градусов, что примерно соответствует тепловому потоку порядка q_v=200 кВт/м^2, характерного для реакторов на основе микротвэлов [2]. Условия численного расчета соответствовали следующим параметрам: начальное давление воды на входе в рабочий участок P_1=0.9 МПа, массовая скорость потока – 550 кг/м^{2}с, материал засыпки – сталь, порозность засыпки – 0.38, диаметр шаровой засыпки – 4 мм.

Присутствие в канале засыпки с температурой равной начальной температуре потока приводит к некоторому увеличению выходного паросодержания как для частиц диаметром 2, так и 4 мм по сравнению со случаем недогрева, что, по-видимому, связано с термогазодинамическими эффектами парожидкостного потока в канале, где накладывается процесс теплообмена от потока к шаровой засыпке. В случае начального недогрева элементов зернистого слоя конечное паросодержание уменьшается поскольку на термогазодинамические эффекты парожидкостной смеси в канале накладывается влияние поглощения части тепла из потока на прогрев шаровой засыпки. Однако анализ расчетов

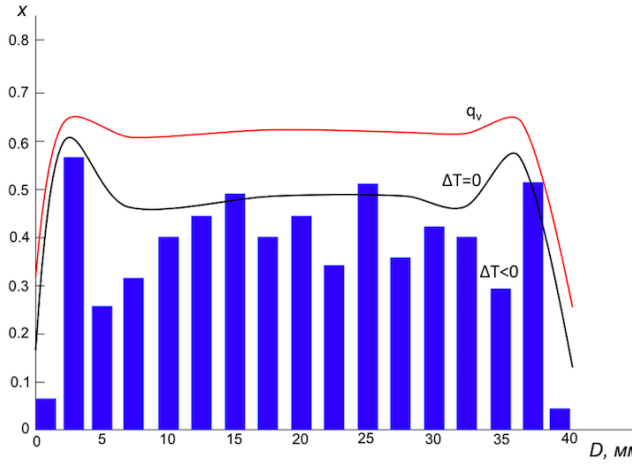


Рис. 1. Распределение массовой доли пара по сечению канала в конце рабочего участка при L=355 мм. Хнач=0.05.

показал, что на конечное паросодержание оказывает большее влияние геометрические параметры засыпки по сравнению с теплофизическими свойствами этих материалов.

Работа подготовлена в рамках выполнения базовой части государственного задания ФГБОУ ВО "Московский политехнический университет" (проект АААА-А20-120092190052-9).

Список литературы

1. **Таиров Э.А., Покусаев Б.Г., Быкова С.М.** Критическое истечение парожидкостного потока через слой шаровых частиц // ТВТ. 2016. Т. 54. № 2. С. 277-286.
2. **Сорокин В.В.** Расчет теплоотдачи засыпки шаровых тепловыделяющих элементов к двухфазной жидкости // ТВТ. 2008. Т. 46. № 4. С. 575-581.

D.P. Khramtsov [1], A.A. Moshin[2], D.A. Nekrasov[2]

[1] MIREA - Russian Technological University,
Russia, 119454 Moscow, pr. Verdanskogo, 78
[2]Moscow Polytechnic University,
Russia 107023 Moscow, ul. Bolshaya Semenovskaya, 38

MODELLING OF THE VAPOR PHASE DISTRIBUTION OVER THE CROSS SECTION OF A CHANNEL WITH GRANULAR LAYER UNDER CRITICAL FLOW CONDITIONS

УДК 536.423.1

И.А. Молотова[1], А.Р. Забиров[1,2], В.В. Ягов[1], Н.Н. Антонов[2]

[1]НИУ «Московский Энергетический Институт»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14
[2] Объединенный институт высоких температур РАН,
111116, Москва, Красноказарменная, 17А

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕЛ НА ТЕПЛООБМЕН ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ В ЖИДКОСТЯХ

Изучение нестационарных процессов охлаждения высокотемпературных тел имеет важное значение для различных отраслей промышленности, в частности, для ядерной энергетики. В случае возникновения аварии с потерей теплоносителя (loss-of-coolant-accident) происходит перегрев топливной оболочки, в результате чего срабатывает система аварийного охлаждения активной зоны ядерного реактора. Для обоснования с позиций теплофизики предлагаемого нового толерантного топлива необходимо изучить влияние свойств поверхностей на процессы охлаждения горячих тел в жидких средах. Многочисленные работы отечественных и зарубежных исследователей (например, [1]) свидетельствуют о прямом влиянии свойств поверхностей на теплообмен при охлаждении высокотемпературных тел. Изменения параметров поверхностей путем их модификации или нанесения различных покрытий может существенно повлиять на температуру перехода к интенсивному режиму охлаждения.

Эксперименты проводились на установке, представленной в работе [2]. Образцы представляют собой цилиндры диаметром 10 мм и длиной 50 мм, выполненные из различных металлов (полированные, а также с модифицированной поверхностью). Предварительно была проведена профилометрия поверхностей, на рисунке 1 представлены результаты микроскопии поверхности цилиндра из нержавеющей стали, выполненной при помощи оптического микроскопа. Полировка осуществлялась с использованием виброгалтовочного оборудования Walther Trowal. Температура измерялась в центре образцов и на поверхности с использованием термопар. В ходе экспериментов были получены зависимости температур от времени – термограммы охлаждения. С применением программного комплекса ANSYS производился расчет коэффициентов теплоотдачи и плотностей тепловых потоков с последующим моделированием температурных полей внутри охлаждаемых образцов в процессе их охлаждения.

Полученные экспериментальные результаты дают массив данных для проверки и уточнения физической модели возникновения интенсивного режима охлаждения, разработанной в 2018 году [3].

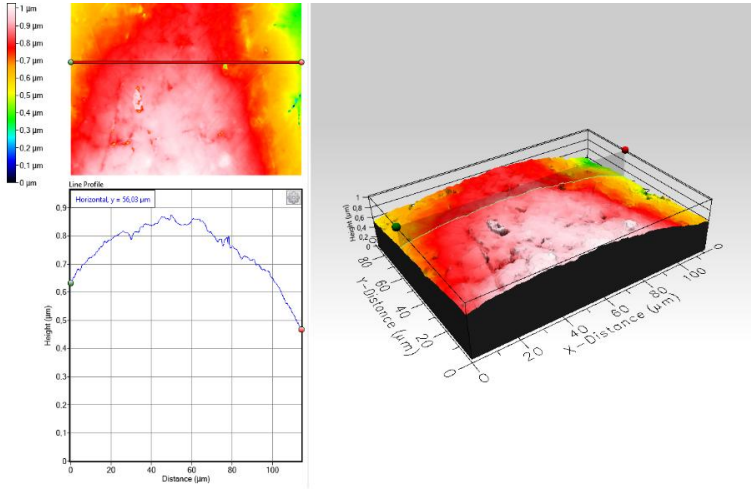


Рис. 1. Микроскопия поверхности полированного цилиндра из нержавеющей стали.

Исследования были проведены при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований, проект №19-38-60057.

Список литературы

1. **Dedov A. V., Zabirov A. R., Sliva A. P., Fedorovich S. D., Yagov V. V.** Effect of coating by a carbon nanostructure on heat transfer with unsteady film boiling // High Temperature. 2019. V. 57. №. 1. P. 63-72.
2. **Kanin P. K., Ryazantsev, V. A., Lexin, M. A., Zabirov, A. R., Yagov, V. V.** Heat transfer enhancement at increasing water concentration in alcohol in the process of non-stationary film boiling // J. Phys.: Conference Series. 2018. V. 980. P. 012029-1.
3. **Yagov V. V., Zabirov A. R., Kanin P. K.** Heat Transfer at Cooling High-Temperature Bodies in Subcooled Liquids // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2018. V. 126. P. 823–830.

I.A. Molotova[1], A.R. Zabirov[1,2], V.V. Yagov[1], N.N. Antonov[2]

[1]National Research University “Moscow Power Engineering Institute”,
Krasnokazarmennaya 14, Moscow, 111250 Russia
[2]Joint Institute of High Temperature,
Russia, 111116 Moscow, Krasnokazarmennaya, 17A

EFFECT OF SURFACE PROPERTIES OF HIGH-TEMPERATURE BODIES ON HEAT TRANSFER DURING COOLING IN LIQUIDS

УДК 621.187.12

Р.И. Камалова,[1] *М.М. Замалеев*[1]*, В.Н. Ковальногов*[1]*, Д.Ф. Хусаинова*[1]

[1] Ульяновский государственный технический университет,
432027, Ульяновск, Северный Венец, 32

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ ДЕАЭРАЦИИ ВОДЫ УХОДЯЩИМИ ГАЗАМИ КОТЛА

Процесс удаления коррозионно-активных газов из питательной воды для котельных установок тепловых электрических станций является сложным синтезом одновременного протекания двух его составляющих – теплообмена и массообмена. Теплообмен являет собой процесс нагрева деаэрируемой воды до температуры насыщения. Массообмен обеспечивается выделением коррозионно-агрессивных газов из деаэрируемой воды в паровую среду. Водяной пар при этом считается традиционным видом десорбирующего агента и на сегодняшний момент является единственной широко применяемой средой, обеспечивающей процесс дегазации питательной воды котлов и подпиточной воды теплосети.

Научно-исследовательская лаборатория «Теплоэнергетические системы и установки» Ульяновского государственного технического университета предлагает различные решения для повышения энергоэффективности процесса деаэрации воды [1, 2]. Одним из перспективных направлений разработок в данной сфере является повышение тепловой экономичности процесса деаэрации с применением нетрадиционных сред в качестве десорбирующего агента, например, использование в деаэраторе в качестве десорбирующего агента уходящих газов котла, работающего на природном газе [3].

Данная технология предложена для реализации процесса дегазации воды с использованием атмосферного деаэратора. При этом не требуется существенного изменения конструкции самого аппарата, необходимо только обеспечить подвод десорбирующей среды к колонке деаэратора.

Для оценки массообменной и энергетической эффективности данного решения произведен расчет теоретически необходимого удельного расхода десорбирующего агента для удаления из воды растворенного кислорода. Расчет выполняется на основе решения балансовых уравнений процессов массообмена и теплообмена при термической деаэрации при условии, что на выходе из деаэратора достигается равновесие между фазами [4]. При этом принимается, что максимальная массообменная и энергетическая эффективность термического деаэратора достигается при минимально возможных расходах десорбирующего агента и смеси выделившихся газов, выпускаемым деаэратором.

Уходящие газы газоплотного котла практически не содержат кислорода вследствие его полного расходования на процесс горения топлива (природного газа) в топке котла. В связи с несовершенством аэродинамики топочных устройств и невозможностью идеального (т.е. на молекулярном уровне) смешения топлива и окислителя в реальных условиях, для полного сгорания топлива необходимо несколько большее количество воздуха, чем теоретический объём воздуха, полученный из стехиометрических уравнений горения. Концентрация кислорода в десорбирующем агенте на выходе из деаэратора зависит от схемы движения воды и пара в аппарате.

Отметим, что область применения предложенного технического решения ограничена использованием газоплотных котлов, работающих на природном газе. Наибольшая эффективность может быть достигнута при нестехиометрическом сжигании природного газа.

Разработка предложенного метода дегазации воды также включает в себя необходимость решение проблемы избыточного содержания двуокиси углерода в уходящих газах и ее негативного воздействия на качество деаэрированной воды. Для нейтрализации углекислоты в деаэрированной воде предлагается дозирование щелочного реагента, например, гидроксида натрия.

Исследования выполнены при финансовой поддержке грантом Президента Российской Федерации по проекту НШ-2493.2020.8

Список литературы

1. Подготовка подпиточной воды систем теплоснабжения с применением вакуумных деаэраторов / В.И. Шарапов. М.: Энергоатомиздат, 1996. 176 с.
2. Справочно-информационные материалы по применению вакуумных деаэраторов для обработки подпиточной воды систем централизованного теплоснабжения / В.И. Шарапов. М.: СПО ОРГРЭС, 1997. 20 с.
3. **Шарапов В.И., Камалова Р.И., Кудрявцева Е.В., Рогачев С.С.** Котельная установка // Патент на изобретение RU 2629321 C1. Изобретения полезные модели. 2017. №25.
4. Термические деаэраторы / В.И. Шарапов Цюра Д.В., Ульяновск: изд-во УлГТУ, 2003. 560 с.

M.M. Zamaleev [1], R.I. Kamalova [1], V.N. Kovalnogov [1], D.F. Khusainova [1]

[1] Ulyanovsk State Technical University,
32 Severny Venets, Ulyanovsk, 432027, Russia

ELABORATION OF TECHNOLOGIES FOR WATER DEAERATION WITH EXHAUST GASES

УДК 621.9

Д.Д. Бабенко, А.С. Дмитриев, И.А. Михайлова

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

О ДИНАМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТАХ ИСПАРЕНИЯ И КИПЕНИЯ КАПЕЛЬ НА НЕОДНОРОДНЫХ ГРАФЕНОВЫХ ПОДЛОЖКАХ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ТЕРМОМЕНЕДЖМЕНТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Растущий интерес к процессам охлаждения энергетических и электронных устройств связан как с постоянным уменьшением размеров компонент, так и с растущей удельной мощность тепловыделения. Особенно это наблюдается в задачах термостабилизации топливных элементов, солнечных батарей, систем хранения электрической энергии (термофотоячейках) и т.п. [1,2]. Стандартные методы воздушного, конвективного (как однофазного, так и двухфазного) методов термостабилизации не могут обеспечить необходимых рабочих режимов, поэтому в последнее время основной интерес вызывает использование графеновых структур и нанокомпозитов, а также активное капиллярно-пористое и испарительное охлаждение [3,4].

В данной работе исследуются процессы охлаждения поверхности элементов тепловыделения с помощью одиночных капель и капельных потоков рабочих жидкостей (вода, 50% водный раствор этилового спирта, этиловый спирт, ацетон, специальная охлаждающая жидкость 3M Novec 7100), взаимодействующих с перегретой поверхностью (диапазон температур – от 30 до 450 ^{0}C) с использованием новых подходов, связанных с использованием сеточных структур (размер регулярных металлических сеток – от 30 до 300 мкм), а также нанопористых структур из графеновых хлопьев, а также их комбинаций. Изучение процессов смачивания (измерение контактных углов в широком температурном диапазоне), скоростей испарения и кипения капель, показали, что такой метод позволяет обеспечить весьма высокие скорости охлаждения, сравнимые с использованием микроканального охлаждения и пузырькового кипения.

В области температур выше температуры пленочного кипения (температура Лейденфроста) обнаружены важные особенности поведения капель, как в процессе соударения с неоднородной поверхность, так и при применении графеновых компонент. Показано, что структура поверхности способна управлять температурой Лейденфроста (заметно повышая ее), а также повышать скорости испарения и кипения. На рис.1 показана зависимость времени испарения от температуры образ-

ца для сеточной медной структуры, которая помещена внутрь пористого графенового материала.

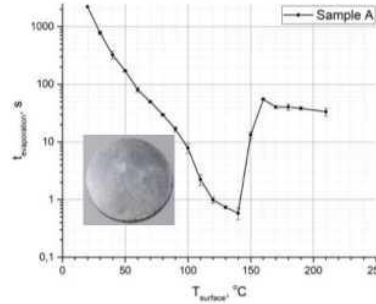


Рис.1. Зависимость времени испарения от температуры поверхности образца

Как результат, можно отметить, что скорость испарения в такой структуре при прессовании графена под давлением 300 бар, дает время испарения примерно 2200 сек, а для давления 180 бар – 1829 сек, что говорит о влиянии пористости графена на скорость испарения. Поскольку графеновые хлопья отлично впитывают жидкости, то испарение может идти не с поверхности, а из слоя внутри композита, а, следовательно, из области с более высокой температурой. Модель такого процесса в настоящее время разрабатывается.

Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 17-19-01757).

Список литературы

1. **Дмитриев А.С.** Введение в нанотеплофизику. М.: БИНОМ, 2015. 756 с.
2. **Dmitriev A.** (2019). Hybrid Graphene Nanocomposites: Thermal Interface Materials and Functional Energy Materials. 10.5772/intechopen.89631.
3. **Geraldi N., McHale G., Xu B.** et. al. Leidenfrost transition temperature for stainless steel meshes. Materials Letters,Vol. 176, 2016, Pp 205-208.
4. **Babenko D. D., Dmitriev A.S., Mikhailova I. A.** Thermohydrodynamic processes of droplet evaporation and boiling on functional nanomaterials surfaces. J. Phys.: Conf. Ser. 2020. 1565 012010.

D.D. Babenko, A.S. Dmitriev, I.A. Mikhailova

National Research University “MPEI”
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya, 14

ON DYNAMIC EFFECTS DROPLETS EVAPORATION AND BOILING ON INHOMOGENEOUS GRAPHENE SUBSTRATES FOR EFFECTIVE THERMOMANAGEMENT OF ENERGY DEVICES

УДК 536.4

В.Н. Андбаева, А.С. Панасенко

Институт теплофизики УрО РАН,
620016, Екатеринбург, Амундсена, 107А (•)

КАПИЛЛЯРНАЯ ПОСТОЯННАЯ СИСТЕМЫ ПРОПАН–ВОДОРОД–ГЕЛИЙ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

В технологических процессах в качестве рабочих жидкостей широко используются растворы. В связи с чем в последние годы большое внимание стали уделять исследованиям их теплофизических свойств. В частности, проведены измерения поверхностного натяжения многих двухкомпонентных систем [1-5].

Данная работа посвящена исследованию влияния малых добавок гелия и водорода на капиллярную постоянную a^2 пропана (R-290). При известной разности ортобарических плотностей жидкой и газовой фазы знание капиллярной постоянной позволяет определить поверхностное натяжение раствора.

Измерения капиллярной постоянной проведены дифференциальным методом капиллярного поднятия по двум изотермам T=297.04 и 323.15 К при различных концентрациях водорода в пропане, которая определялась по данным о фазовом равновесии раствора пропан–водород [6, 7].

Первоначально была измерена a^2 чистого пропана. Данные по a^2 в пределах погрешности эксперимента (±1 %) согласуются с ранее полученными значениями этой величины [3, 4]. Затем к пропану добавлялся водород и производились измерения капиллярной постоянной полученного раствора. Далее к раствору добавлялся гелий и производились измерения a^2 трехкомпонентного раствора. Добавки гелия в раствор пропан–водород ограничивались значением полного давления в системе 4 МПа. Давление измерялось пружинным манометром с погрешность ±0.006 МПа. Термостатирование производилось прокачкой через измерительную ячейку полимитилсилоксановой жидкости (ПМС-20) с помощью термостата Julabo SL 12. Погрешность измерения капиллярной постоянной не превышает 2 %.

Как отмечалось в работах [4, 5], добавление водорода в пропан приводит к уменьшению, а гелия – к увеличению капиллярной постоянной чистого пропана. Рис. 1 иллюстрирует бариическую зависимость капиллярной постоянной раствора пропан–водород–гелий при T=297.04 К. Бариическая зависимость аппроксимируется линейной функцией. При T=323.15 К влияние гелия на поверхностное натяжение раствора про-

(•) В.Н. Андбаева, andbaeva@mail.ru

пан–водород в пределах погрешности определения капиллярной постоянной a^2 несущественно: добавление гелия в систему пропан–водород не изменяет ее значений.

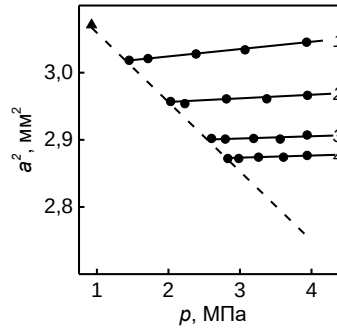


Рис. 1. Барическая зависимость капиллярной постоянной раствора пропан–водород–гелий при T=297.04 К и концентрации водорода: *1* — x=0.524 моль%; *2* — 0.111; *3* — 1.693; *4* — 1.926. Пунктирная линия – капиллярная постоянная раствора пропан–водород [4]. Треугольник – значение a^2 чистого пропана.

Список литературы

1. **Baidakov V.G., Khotienkova M.N., Andbaeva V.N., Kaverin A.M.** Capillary constant and surface tension of methane–nitrogen solutions: 1. Experiment // Fluid Phase Equilibria. 2011. V. 301. P. 67—72.
2. **Baidakov V.G., Kaverin A.M., Khotienkova M.N., Andbaeva V.N.** Surface tension of an ethane–nitrogen solution. 1. Experiment and thermodynamic analysis of the results // Fluid Phase Equilibria. 2012. V. 328. P. 13—20.
3. **Baidakov V.G., Khotienkova M.N.** Capillary constant and surface tension of propane (R-290) with helium dissolved in it // Int. J. Refrig. 2019. V. 98. P. 261—265.
4. **Andbaeva V.N., Baidakov V.G.** Capillary constant and surface tension of propane (R-290) with small additives of hydrogen // Fuel. 2021. V. 287. P. 119546.
5. **Андбаева В.Н., Хотиенкова М.Н.** Экспериментальное исследование поверхностного натяжения раствора этан–метан в интервале температур 213-283 К // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20. № 3. С. 393—397.
6. **Trust D.B., Kurata F.** Vapor-liquid phase behavior of the hydrogen-propane and hydrogen-carbon monoxide-propane system // AIChE Jornal 1971. V. 17. P. 86—91.
7. **Williams R.B., Katz D.L.** Vapor liquid equilibria in binary systems. Hydrogen with ethylene, ethane, propylene, and propane // Ind. Eng. Chem. 1954. V. 46.:P. 2512—2520.

V.N. Andbaeva, A.S. Panasenko

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

CAPILLARY CONSTANT OF THE PROPANE–HYDROGEN–HELIUM SYSTEM AT HIGH TEMPERETURES

УДК 621.9

В.О. Майоров[1, 2], *А.К. Ястребов*[2], *В.Ю. Левашов*[1]

[1] Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М В. Ломоносова,
119192 Москва, Мичуринский проспект, д. 1 (•)

[2] Национальный исследовательский университет "МЭИ",
111250, Москва, Красноказарменная, д. 14

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КАПЕЛЬ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ВБЛИЗИ МЕЖФАЗНОЙ ГРАНИЦЫ ПРИ ИНТЕНСИВНОМ ИСПАРЕНИИ

Известно, что при интенсивном испарении жидкости вблизи межфазной поверхности образовавшийся пар находится в метастабильном состоянии, то есть давление пара превосходит давлении насыщения при температуре в окружающей среде [1]. В объеме такого пара могут образовываться капли, причем механизм конденсации может быть, как гомогенный, так и гетерогенный, если в среде присутствуют твердые частицы. Адекватное описание процессов интенсивного испарения, образования и роста конденсированных частиц вблизи межфазной поверхности является актуальной задачей в связи с развитием современных технологий и исследованием природных явлений. В частности, анализ таких процессов может быть важным для изучения капельных кластеров, имеющих упорядоченную структуру [2] и для разработки эффективной теплообменной аппаратуры для микро- и нано электроники.

В данной работе рассматриваются только процессы гомогенного образования и последующего роста капель в объеме парогазовой смеси. Задача об объемной конденсации пересыщенного пара считается пространственно однородной. В начальный момент времени задаются следующие параметры парогазовой смеси: давление p_0, температура T_0 и степень пересыщения пара S_0 (отношение парциального давления пара к давлению насыщения при температуре T_0). Следует отметить, что значение степени пересыщения S_0 может быть поставлено в соответствие массовому потоку, испаряющегося пара с межфазной границы. Моделирование объемной конденсации пересыщенного пара базируется на прямом численном решении кинетического уравнения для функции распределения капель по размерам [3]. Математическое описание также включает в себя уравнения энергии для парогазовой смеси и жидкости, а также уравнения баланса массы компонентов смеси, состоящей из пара, газа и капель. Для определения скоростей нуклеации и роста капель используются формулы Френкеля – Зельдовича и Герца

(•) В.О. Майоров, vyacheslav7794@gmail.com

– Кнудсена соответственно. Макроскопические характеристики двухфазной среды определяются как моменты функции распределения.

Проведенные расчеты для влажного воздуха при давлении p_0 = 1 бар, температуре T_0 = 300 К и различных степенях пересыщения S_0 показали, что нуклеация становится заметной, когда начальная степень пересыщения водяного пара S_0 больше или равна 3. Также было показано, что число капель в единице объема смеси при увеличении степени пересыщения возрастает, а средний радиус конденсированных частиц – уменьшается (Рис. 1).

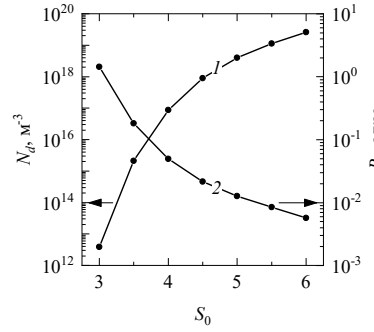


Рис. 1 Зависимость числовой плотности (кривая *1*) и среднего размера (кривая *2*) сконденсировавшихся капель от начальной степени перегрева

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 20-38-90042).

Список литературы

1. Действие излучения большой мощности на металлы / С.И. Анисимов, Я.А. Имас, Г.С. Романов, Ю.В. Ходыко. М.: Наука, 1970. 272 с.
2. **Fedorets A.A**. Droplet cluster // JETP Letters. 2004. Vol. 79. P. 372—374.
3. **Корценштейн Н.М., Самуйлов Е.В., Ястребов А.К.** Новый метод моделирования объемной конденсации пересыщенного пара // ТВТ. 2009. Т. 47. № 1. С. 89—100.

V.O. Mayorov [1,2], A.K. Yastrebov [2], V.Yu. Levashov [1]

[1] Institute of mechanics MSU
Russia, 119192 Moscow, Michurinsky Prospekt. 1
[2] National Research University "MPEI
Russia, 111116 Moscow, Krasnokazarmennaya, 14

INVESTIGATION OF DROPLETS CHARACTERISTICS FORMED NEAR THE INTERFACE DURING INTENSIVE EVAPORATION

УДК 536.423

Г.В. Панов[1], *А.В. Решетников*[1]

[1] Институт теплофизики УрО РАН,
Екатеринбург, 620016, Амундсена, 107А

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА РАСПЫЛ СТРУЙ ВСКИПАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ

Струи вскипающей жидкости встречаются в природных явлениях. Они находят широкое применение в технике и технологических процессах. Актуальность изучения потока вскипающей жидкости связана с запросами атомной энергетики, с проблемой безопасности энергетических установок. В современном энергетическом оборудовании используются теплоносители с рабочими параметрами (температура, давление) близкими к параметрам термодинамической критической точки. При аварийных ситуациях с образованием течи в тракте теплоносителя могут реализовываться условия взрывного парообразования на центрах флуктуационной природы [1]. Также большой интерес к изучению дисперсных потоков обусловлен их широким применением в медицине, косметике, а главное, в процессах с горением.

Изучение эволюции формы, структуры и дисперсности струй перегретой жидкости проводилось при истечении из камеры высокого давления через короткие каналы различной геометрии в атмосферу. Использование коротких каналов позволило перевести жидкость в область метастабильных фазовых состояний и исследовать проявление взрывного вскипания. Короткие каналы имели цилиндрическую, квадратную, треугольную и щелевую формы. В качестве рабочей жидкости использовала вода. Исследование проводилось на интервале температур T_0 = 130÷320 °C.

Опытным путем было установлено, что при использовании цилиндрического квадратного и треугольного каналов при малых перегревах (T_0 = 130÷150 °C) в струе имеется жидкостная сердцевина. Вскипание происходит вдали от канала на отдельных, невзаимодействующих пузырьках. При умеренных перегревах (T_0 = 160÷190 °C) угол раскрытия струи увеличивается с возрастанием температуры. Из канала вытекала двухфазная среда, имеющая конусообразный вид. При высоких перегревах (T_0 = 210÷270 °C), наблюдалось полное раскрытие струи – радиальное растекание парожидкостного потока по прилегающим смежным поверхностям рабочей камеры. Отличительная особенность полного развала струй, истекающих из квадратного и треугольного каналов, заключалась не в изотропном распространении потока по всем направлениям, как в случае истечения через цилиндрический канал, а в течении преимущественно из углов соответствующего канала. При приближении к предельным перегревам ($T_0 \geq 280$ °C), вследствие смеще-

ния сечения вскипания вглубь канала, независимо от его геометрии струя схлопывалась и приобретала форму близкую к газовой струе. Также были обнаружены интенсивные пульсации струи с $1/f$-спектром при переходных режимах кипения воды (смене парообразования на отдельных немногочисленных центрах при малых перегревах интенсивным гетерогенным зародышеобразованием в условиях высоких перегревов). Флуктуации в струе вскипающей жидкости измерялись методом фотометрии лазерного излучения, прошедшего через двухфазную струю в различных её сечениях. Полученный сигнал оцифровывался, преобразовывался методом Фурье и спектр имел $1/f$-зависимость.

Таким образом было установлено, что интегральные и флуктуационные характеристики струи помимо степени перегрева, механизма парообразования в ней зависят не только от геометрической формы канала, но и от внешних геометрических условий за выходом из канала.

Список литературы

1. Скрипов В.П. Метастабильная жидкость. М.: Наука, 1972. 312 с.
2. **Коверда, В.П., Скоков, В.Н., Скрипов В.П.** $1/f$ - при неравновесном фазовом переходе. Эксперимент и математическая модель. // ЖЭТФ. 1998. Т. 113, вып. 5.С. 1748-1757.

G.V. Panov [1], *A.V. Reshetnikov* [1]

[1] Institute of Thermal Physics UB RAS,
Russia 620016 Yekaterinburg, Amundsena, 107A

IMPACT OF GEOMETRIC FACTORS ON SPRAYING OF BOILING-UP LIQUID JETS

УДК 536.223

Д.А. Галкин, П.В. Скрипов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук,
Екатеринбург, 620016, Амундсена 107а [(•)]

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ППГ-425 И ППГ-725

Исследование поведения двухкомпонентных систем с нижней критической температурой растворения (НКТР) представляет серьезный научный интерес. Для растворов высокомолекулярных жидкостей характерна высокая вязкость и, соответственно, низкий коэффициент диффузии. Это делает возможным более глубокий заход в область метастабильных состояний.

Одним из этапов исследования является измерение теплофизических свойств раствора в области устойчивых состояний, а именно коэффициента теплопроводности в широком диапазоне температур от 0 ^{0}C до температуры фазового перехода по механизму жидкость-жидкость. В виду очевидных трудностей моделирования транспортных свойств вещества наиболее информативным инструментом оказывается эксперимент.

Объектами исследования являются сложные жидкие среды, поэтому в качестве наиболее подходящего метода подобных измерений был выбран метод нестационарного нагрева тонкого проволочного зонда (Transient Hot Wire Method – THW). Обзор научной литературы, связанной с THW методом, показал, что в широко применяемых коммерческих установках не выполняется ключевое требование модели – поддержание постоянства плотности теплового потока [1] (постоянства мощности на нагревателе-зонде в ходе импульса нагрева). Выполнение этого требования является сложной задачей, поскольку свойства материала зонда и исследуемого вещества зависят от температуры. Как следствие, задача поддержания постоянства мощности ранее так и не была решена [2]. Поэтому в известных реализациях THW метода прибегают к различного рода пересчетам, существенно усложняющим процедуру сбора первичных данных.

Используемая ранее для исследования термонапряженных процессов методика управления мощностью, рассеиваемой на нагревателе-зонде [3], послужила основой для разработки собственной установки, работающей по принципу THW [4,5]. Нам удалось адаптировать созданную ранее методику постоянной мощности применительно к задачам THW, подразумевающим сравнительно малые значения темпера-

[(•)] Д.А. Галкин, dmitry.gal10@gmail.com

турного напора (единицы К) и большие длительности греющего импульса (единицы секунд). Точность поддержания установленного значения мощности составляет величину не хуже 99,95%. Проверка на эталонных жидкостях показала хорошее согласие получаемых данных со справочными данными.

В докладе будут представлены результаты по измерению коэффициента теплопроводности водного раствора полипропиленгликоля с молекулярными массами, равными 425 (ППГ-425) и 725 (ППГ-725). Область изменения содержания воды составляла от 0 до 1, температуры – от 0 ^{0}C до температуры фазового разделения раствора по механизму жидкость-жидкость.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта №. 19-19-00115

Список литературы

1. **Assael, M.J., Antoniadis, K.D., & Wakeham, W.A.** Historical evolution of the transient hot-wire technique // Int. J. Thermophys. Vol. 31. 2010. P. 1051–1072.
2. **Hakansson B., Andersson P., Backstrom G.** Improved hot-wire procedure for thermophysical measurements under pressure // Rev. Sci. Instrum. 1988. V. 59, № 10. P. 2269-2276.
3. **Машкинов Л.Б., Жуков С.А., Ечмаев С.Б**. Компенсационный электротермограф для жидкостей и газов // ПТЭ. 2007. №1, с. 147-150.
4. **Rutin S.B., Galkin D.A., Skripov P.V.** Returning to classic conditions of THW-technique: A device for the constant heating power mode // Int. J. Heat Mass Transfer. 2017. V. 115, P. 769-773.
5. **Rutin S.B., Galkin D.A., Skripov P.V.** Comments on “Low cost and new design of transient hot-wire technique for the thermal conductivity measurement of fluids” (Appl. Therm. Eng. 105 (2016) 142) // Applied Thermal Engineering. 2018. V. 129, P. 145-147.

D.A. Galkin, P.V. Skripov

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

THE MEASUREMENT OF THERMAL CONDUCTIVITY OF WATER SOLUTIONS OF PPG-425 AND PPG-725

УДК 621.9

Р.А. Аксянов, Ю.С. Коханова, Е.С. Куимов, И.А. Попов

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

ИССЛЕДОВАНИЕ КИПЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ЖИДКОСТЕЙ НА МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Исследованиям интенсификации процессов кипения в условиях свободной конвекции посвящено огромное количество научных работ, однако данная тема остается актуальной [1]. Причиной ситуации служит неопределенность в механизмах повышения уровня теплоотдачи при кипении и развитие технологий производства поверхностей кипения. В работе рассмотрены результаты комплексных исследований кипения на микроструктурированных поверхностях, полученных методом деформирующего резания.

Приводятся результаты обобщения более 730 экспериментальных точек [2-7] с использованием метода полиноминальной регрессии. Получена зависимость для расчета коэффициента теплоотдачи при кипении воды, этанола, 60% водного раствора глицерина, фреонов R113 и R123, хладона Novec 649 в большом объеме на поверхностях кипения с двухмерным рельефом (микроребра), описывающая все экспериментальные точки с отклонением ±30% при доверительной вероятности 0,95. Зависимость справедлива в диапазоне $q=3800\text{-}2{,}17\text{-}10^6$ Вт/м^2, K_q=5-11500, 0/90=0,72-1, h/l_0=0,09-1,45, M_0=0,002-1,29, S/l_0= 0,01-1, Pr=1,75-35,7, F/F_0=1,66-9,75.

В ходе обобщения более 500 экспериментальных точек [2-6,8,9] получена зависимость для расчета коэффициента теплоотдачи при кипении воды, этанола, 60% водного раствора глицерина, фреонов R11, R113, R123, R134a в большом объеме на поверхностях кипения с трехмерным рельефом (микроштырьковые структуры), описывающая экспериментальные точки с отклонением ±30% при доверительной вероятности 0,85. Зависимость справедлива в диапазоне $q=2400\text{-}3{,}5\text{-}10^6$ Вт/м^2, K_q=8,7-22030, 0/90=0,77-1, h/l_0=0,09-0,71, M_0=0,002-0,3, $5/l_0$=0,042-0,42, u/l_0=0,009-0,28, s/l_0=0,02-0,79, Pr=1,75-7,35, F/F_0= =2,23-4,8.

Для повышения надежности и точности прогнозирования предложена и апробирована модель искусственной нейронной сети. Использование данной модели позволило повысить точность прогнозирования. Отклонение результатов прогнозирования от экспериментальных точек не превысило 18%. Показана возможность использования модель искусственной нейронной сети в компьютерных кодах расчета тепло-

массообменных аппаратов с кипящим теплоносителем.

В работе проведено исследование угла смачивания, статического и динамического, поверхностей кипения с двухмерным и трехмерным рельефом на уровень теплоотдачи. Установлено влияние геометрических параметров рельефа на угол смачивания. Также установлено влияние времени работы поверхностей кипения на изменение уровня теплоотдачи.

Работа проведена при поддержке Минобрнауки России в рамках исполнения обязательств по выполнению обязательств по Соглашению 075-03-2020-051/3 от 09.06.2020

Список литературы

1. **Дедов А.В.** Обзор современных методов интенсификации теплообмена при пузырьковом кипении // Теплоэнергетика, 2019, № 12, с. 18-54.
2. **Popov LA., Shchelchkov A.V., Gortyshov Yu.F., Zubkov N.N.** Heat transfer enhancement and critical heat fluxes in boiling of microfinned surfaces. High Temperature. 2017. V.55. №4. Pp.524-534.
3. **Popov LA., Shchelchkov A.V., Zubkov N.N., Kas'kov S.I.**Heat transfer during the boiling of liquid on microstructured surfaces. Part 2: Visualization of boiling and critical heat fluxes. Thermal Engineering. 2013. V.60. №4. Pp.285-294.
4. **Passos J.C., Reinaldo R.F.** Analysis of pool boiling within smooth and grooved tubes. Experimental Thermal and Fluid Science, V.22. 2000. Pp.35-44.
5. **Popov I.A., Shchelchkov A.V., Zubkov N.N., Lei R.A., Gortyshov Y.F.** Boiling heat transfer of different liquids on microstructured surfaces. Russian Aeronautics. 2014. V.57. №4. Pp.395-401.
6. **Popov LA., Shchelchkov A.V.** Boiling of various liquids on microstructurized surfaces. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2014. Т.87. №6. С.1420-1432.
7. **Kaniowski R., Pastuszko R., Nowakowski L.** Effect of geometrical parameters of open microchannel surfaces on pool boiling heat transfer. EPJ Web of Conferences. V. 143, 2017. p.02049.
8. **Kedzierslci M.A** Calorimetric and Visual Measurements of R123 Pool Boiling on Four Enhanced Surfaces. NISTIR 5732. 1995.
9. **Kim Nae-H., Kim J.-W., Kim T.-H.** Effect of Pore Size on the Nucleate Pool Boiling of Structured Enhanced Tubes. J. of Thermal Science Vol.9, No.3. 2000. Pp.230-235.

R.A. Aksyanov, Yu.S. Kokhanov, E.S. Kuimov. I.A. Popov

Kazan National Research Technical University n.a.A.N.Tupolev,
Russia 420111 Kazan, K/Marx str., 10

STUDY OF POOL BOILING OF VARIOUS LIQUIDS ON MOCROSTRUCTURED SURFACES

УДК 621.9

И.И. Крапивин[1], *А.В. Дедов*[1], *А.В. Беляев*[1]

[1] Московский энергетический институт,
111116, Москва, Красноказарменная, 17А (•)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ КИПЕНИИ ПОТОКА ЖИДКОСТИ В КАНАЛЕ С ЭЛЕМЕНТОМ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Работа посвящена экспериментальному исследованию теплоотдачи в вынужденном потоке кипящей жидкости в канале малого диаметра при высоких приведенных давлениях.

Актуальность данных исследований связана с растущим интересом к миниатюрным теплообменным устройствам в различных отраслях промышленности. В данном случае исследование зависимости коэффициента теплоотдачи от параметров потока является фундаментальным.

Для двухфазного потока формулы для расчёта коэффициента теплоотдачи связаны с самыми разными параметрами. Большинство этих формул представляют собой сумму пузырьковой ($\alpha_{пуз}$) и конвективной ($\alpha_{1ф}$) составляющих теплообмена двухфазного потока, которые умножены на коэффициенты, учитывающие их влияние на поток (S и F):

$$\alpha_{2ф} = S\alpha_{пуз} + F\alpha_{1ф}$$

В докладе будет представлено описание экспериментального стенда, рабочего участка, анализ и обобщение опытных данных о теплоотдаче при кипении насыщенного потока жидкости. Планируется выполнение экспериментов с фреоном R125 на вертикальном рабочем участке. Рабочий участок представляет из себя трубку с внутренним диаметром 1 мм, большая часть которой срезана вдоль оси на 1/3 от внешнего диаметра трубки величиной 1.6 мм. Это позволит произвести визуальный анализ структуры потока в зависимости от давления в контуре. Фотография тестового образца показана на рис.1.

В ходе экспериментов будет изменяется тепловая нагрузка на рабочем участке с помощью нагрева переменным электрическим током, относительный недогрев жидкости до температуры насыщения на входе с помощью предварительного нагревателя и давление в контуре с помощью термокомпрессора. Будут получены наборы первичных массивов опытных данных в виде зависимости температуры стенки от теплового потока, массовой скорости и приведенного давления.

(•) И.И. Крапивин, cross@bk.ru

На рис.2 приведён пример полученных ранее экспериментальных данных на трубке диаметром 1 мм и их сопоставления с расчётными значениями.

Рис. 1. Рабочий участок с элементом визуализации потока.

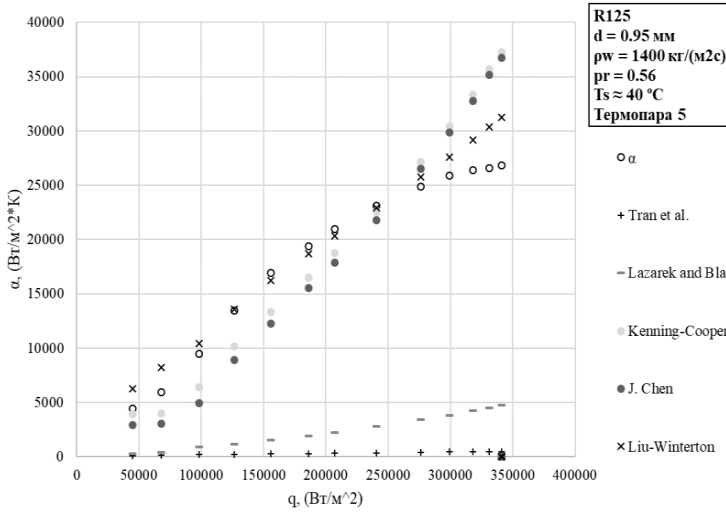


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока.

I.I. Krapivin [1], *A.V. Dedov* [1], *A.V. Belayev* [1]

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

EXPERIMENTAL STUDY OF HEAT TRANSFER IN THE BOILING OF A LIQUID FLOW IN A CHANNEL WITH A VISUALIZATION ELEMENT

УДК 536.248.2

Д.А. Швецов[1], *А.Н. Павленко*[1], *А.Е. Брестер*[2], *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

КАРТА РЕЖИМОВ ИСПАРЕНИЯ И КИПЕНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО СЛОЯ ЖИДКОСТИ НА МОДИФИЦИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Выполнено экспериментальное исследование теплообмена в широком диапазоне изменения высоты слоя н-додекана и рабочего давления. Диапазон изменения высоты слоя 1.7–10 мм, диапазон изменения давления 33–40000 Па. В экспериментах получали кривые кипения при постоянном значении давления над горизонтальным слоем н-додекана. В зависимости от давления и высоты слоя в жидкости образовывались структуры трех основных типов: «воронки», «кратеры» и пузыри. Эксперименты проводились на капиллярно-пористом покрытии, изготовленном с помощью лазерного 3D–принтера [1].

В данной работе построена карта гидродинамических режимов испарения и кипения на модифицированной поверхности. В качестве безразмерного критерия использовалось модифицированное число Якоба:

$$Ja^*=C_p \cdot l_\sigma \cdot q/(h_{LG} \cdot \lambda_L),$$

где C_p – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); l_σ – капиллярная постоянная, м; q – удельный тепловой поток, Вт/м^2; h_{LG} – скрытая теплота парообразования, Дж/кг; λ_L – коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/(м·К).

На рис. 1 представлена зависимость модифицированного числа Якоба от значения P_v/P_{stat}, где P_v – давление пара, Па; P_{stat} – гидростатическое давление слоя жидкости, Па. В этих координатах также приведено сравнение с данными [2].

В данной работе, по сравнению с [2], получен значительно больший диапазон изменения высоты слоя жидкости, рабочего давления и тепловых потоков. Показано существенное разнообразие гидродинамических структур, образующихся в слое жидкости в зависимости от значений Ja^* и P_v/P_{stat}. На карте показано также, что с увеличением числа Ja^* на модифицированной поверхности образуются зоны «макрослоя», в которых значительно интенсифицируется теплообмен [3].

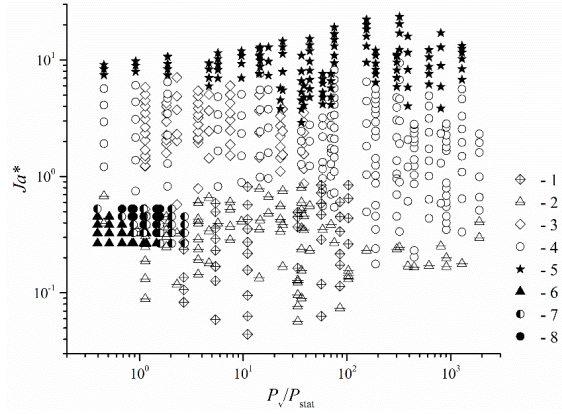


Рис. 1. Карта испарения и кипения горизонтального слоя жидкости на модифицированной поверхности: *1* — «воронки»; *2* — конвекция*;* *3* — «кратеры»; *4* — пузыри; *5* — зоны «макрослоя»; *6* — конвекция [2]; *7* — режимы отдельных пузырей и прерывистого кипения [2]; *8* — режим развитого кипения [2].

Список литературы

1. **Zhukov V.I., Pavlenko A.N., Shvetsov D.A.** The effect of pressure on heat transfer at evaporation/boiling in horizontal liquid layers of various heights on a microstructured surface produced by 3D laser printing // Int. J. Heat Mass Transfer. – 2020. – V. 163. – 120488.
2. **Wojtasik K., Rullière R., Krolicki Z., Zajaczkowski B., Bonjour J.** Subcooled boiling regime map for water at low saturation temperature and subatmospheric pressure Heat transfer and critical phenomena during evaporation and boiling in a thin horizontal liquid layer at low pressures // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2020. – V. 118. – 110150.
3. **Shvetsov D.A., Pavlenko A.N., Brester A.E, Zhukov V.I.** Maps of hydrodynamic regimes of evaporation and boiling in the thin horizontal liquid layer on the modified surface // Journal of Physics: Conference Series 1683 – 2020. – V. 1683. – 022085.

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00180).

D.A. Shvetsov[1], A.N. Pavlenko[1], A.E. Brester[2], V.I. Zhukov[1,2]

[1] Kutateladze Institute of Thermophysics,
Russia, 630090, Novosibirsk, Acad. Lavrentiev ave., 1
[2] Novosibirsk State Technical University,
Russia, 630073, Novosibirsk, K. Marksa ave., 20

A MAP OF REGIMES OF EVAPORATION AND BOILING IN THE HORIZONTAL LIQUID LAYER ON THE MODIFIED SURFACE

УДК 536.24:536.423.1:533.563

А.Е. Брестер[1], *В.И. Жуков*[1,2], *Д.А. Швецов*[2], *А.Н. Павленко*[2]

[1] Новосибирский государственный технический университет,
630073, Новосибирск, К. Маркса пр-т, 20
[2] Институт теплофизики СО РАН им. С.С. Кутателадзе,
630090, Новосибирск, Академика Лаврентьева пр-т, 1

СПЕКТРЫ МОЩНОСТИ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ В ПРОЦЕССАХ ИСПАРЕНИЯ/КИПЕНИЯ ЖИДКОСТИ ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ

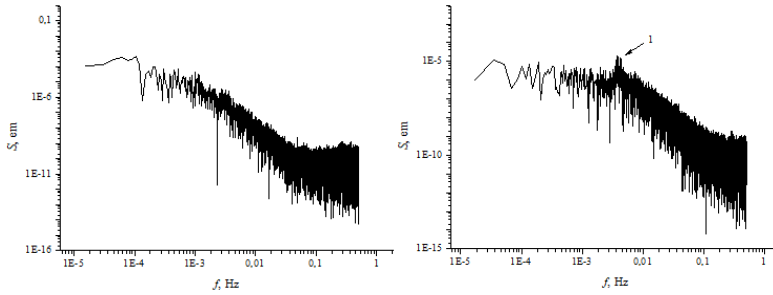
В работе представлены данные пульсаций давления при испарении/кипения жидкости в условиях пониженного давления.

Экспериментальные данные получены в результате исследования теплообмена на гладкой горизонтальной поверхности в широком диапазоне изменения высоты слоя жидкости и рабочего давления. В качестве рабочей жидкости использовался н-додекан. Высота слоя н-додекана менялась в диапазоне 1.7–40 мм, давление – от 33 до 20000 Па. В экспериментах получали кривые кипения при постоянном значении давления над слоем жидкости.

В [1] показано, что при давлении $P \geq 10^4$ Па теплообмен происходил в режиме пузырькового кипения, а при давлении $P \leq 10^3$ Па в пленках жидкости пузырьковое кипение отсутствовало, наблюдался процесс испарения с образованием в слое структур в форме «воронок» и «кратеров». При этом процессы испарения/кипения сопровождаются пульсациями давления, характер которых меняется в зависимости от режима кипения.

В работе [2] показано, что с помощью спектров мощности пульсаций напряжения на проволочном нагревателе, можно определить момент перехода от одного режима кипения к другому, определяя изменение показателя степени α в степенной зависимости спектра мощности пульсаций напряжения от частоты ($S(f) = 1/f^{\alpha}$).

В данной работе, изучалась возможность определения перехода к кризисному режиму испарения/кипения по характеру пульсаций давления. Для этого с помощью быстрого преобразования Фурье были получены спектры мощности пульсации давления от частоты (см. рис. 1). В процессах испарения с образованием в слое структур в форме «воронок» и «кратеров» полученные спектры имели вид $1/f^{\alpha}$. При переходе к кризисному режиму испарения/кипения спектры мощности пульсаций давления от частоты имеют характерный пик (стрелка 1 на рис. 1, б) по сравнению с режим образования «воронок» (см. рис. 1, а).



а б

Рис. 1. Спектры мощности пульсаций давления в режиме испарения/кипения н-додекана при высоте слоя 2.5 мм и давлении 133 Па: а) режим образования «воронок»; б) кризис в слое н-додекана.

Показано что процессы испарения/кипения сопровождаются пульсациями давления, обработка которых позволит определить характерный вид пульсаций для различных режимов испарения/кипения.

Список литературы

1. **Zhukov V.I., Pavlenko A.N.** Heat transfer and critical phenomena during evaporation and boiling in a thin horizontal liquid layer at low pressures // International Journal of Heat and Mass Transfer. - 2018. - Vol.117. - P. 978-990. - DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.060.
2. **Решетников А.В., Скоков В.Н., Коверда В.П., Скрипов В.П., Мажейко Н.А., Виноградов А.В.** Фликкер-шум и самоорганизованная критичность в кризисных режимах кипения // Прикладная механика и техническая физика. - 2002. - Т. 43, №1. С. 131-136.

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00180).

A.E. Brester[1], V.I. Zhukov[1,2], D.A. Shvetsov[2], A.N. Pavlenko[2]

[1] Novosibirsk State Technical University,
Russia, 630073, Novosibirsk, K. Marksa ave., 20
[2] Kutateladze Institute of Thermophysics,
Russia, 630090, Novosibirsk, Acad. Lavrentiev ave., 1

POWER SPECTRA OF PRESSURE PULSATIONS IN THE PROCESSES OF EVAPORATION/BOILING OF A LIQUID AT LOW PRESSURES

УДК 536.24

И.А. Ячевский[1], *П.В. Королёв*[1]

[1] Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14 (•)

СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО КИПЕНИЮ HE-II НА ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ НАГРЕВАТЕЛЕ ВНУТРИ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ

Длительное время на кафедре Низких температур НИУ «МЭИ» проводятся экспериментальные исследования процессов тепломассопереноса при кипении сверхтекучего гелия (He-II) для различных режимных параметров на нагревателях разных форм. Особый интерес представляют опыты по кипению He-II в условиях микрогравитации на цилиндрическом нагревателе, находящемся в полости внутри коаксиальной ему пористой оболочки. При такой реализации процесса кипения есть возможность получить осесимметричную стационарную паровую пленку вокруг нагревателя, при этом пористая структура обеспечит удержание жидкого гелия и паровой плёнки вблизи греющей поверхности. Результаты таких опытов позволят лучше понять роль термического сопротивления межфазной поверхности жидкость-пар в закономерностях образования пленок [1].

Для проведения опытов, описанных выше, была изготовлена специальная экспериментальная ячейка, конструкция которой представлена в [2]. На стенде с данной ячейкой был произведен ряд новых экспериментов (в наземных условиях), в результате которых наблюдалось «шумовое» кипение гелия с разомкнутой пленкой [3], но также впервые удалось достичь режимов с полностью замкнутой паровой пленкой [4].

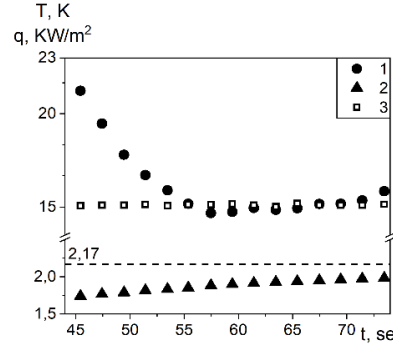


Рис. 1. Ключевые параметры опыта: *1* – температура греющей поверхности, К; *2* – температура жидкого гелия вблизи нагревателя, К; *3* – удельный тепловой поток q, кВт/м^2.

В данной работе представлены данные двух последних экспериментов в результате обработки и сопоставления кото-

(•) И.А. Ячевский, YachevskyIA@mpei.ru

рых были установлены режимные параметры (рис. 1), позволяющие получать замкнутую паровую пленку. Опыты проводились на нагревателе диаметром 3 мм и длиной 30 мм, находящемся внутри цилиндрической пористой структуры толщиной 7.5 мм с радиусом внутренней свободной полости 13,8 мм и величиной проницаемости $2{,}5 \cdot 10^{-12}$ м^2. В ходе опытов жидкий He-II охлаждался до 1.6 – 1.7 К, После чего на нагреватель подавалась начальная нагрузка около 20 кВт/м^2. Управление процессом кипения осуществлялось путем изменения подаваемого напряжения на нагреватель и контролем его температуры, для чего на его поверхности был установлен высокоточный терморезистивный датчик ТВО. Таким образом, при поддержании температуры греющей поверхности на уровне 16 –18 К и относительно небольших глубинах погружения ячейки в жидкий гелий можно было наблюдать на поверхности нагревателя замкнутую паровую пленку с волнообразной поверхностью. Данный результат был неоднократно получен в ходе различных серий эксперимента, что позволяет более подробно описать этот режим кипения. Фото- и видеоданные кипения будут представлены в докладе.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект 19-19-00321).

Список литературы

1. **Королев П.В., Крюков А.П., Пузина Ю.Ю.** Экспериментальное исследование кипения сверхтекучего гелия (He-II) внутри пористого тела. // Прикладная механика и техническая физика. 2017. Т. 58. № 4. С. 126-134.
2. **Королев П.В., Крюков А.П., Пузина Ю.Ю.** Конструкция экспериментальной ячейки для исследования кипения гелия-II в условиях невесомости. // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. 2012. Т. 130. №. 5. С. 43-50.
3. **P.V. Korolyov and I.A. Yachevsky** An experiment on He-II film boiling inside the porous structure. // Journal of Physics: Conf. Series 1128 (2018) 012050.
4. **P.V. Korolyov, I.A. Yachevsky, Yu.Yu. Puzina and A.P. Kryukov** The formation of a closed vapor film during boiling of helium II on a cylindrical heater inside the porous structure. // J. Phys.: Conf. Ser. 1675 (2020) 012059.

I.A. Yachevsky [1], P.V. Korolyov[1]

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

COMPARISON OF THE RESULTS OF EXPERIMENTS ON HE-II BOILING ON A CYLINDRICAL HEATER INSIDE A POROUS STRUCTURE

УДК:532.529.5

Н.Б. Миськив, А.Ф. Серов, А.Д. Назаров, В.Н. Мамонов

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
Новосибирск, проспект академика Лаврентьева 1

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМА ГАЗА В ГАЗОЖИДКОСТНОМ ПОТОКЕ

В настоящее время существует проблема быстрой, надежной и недорогой методики измерения объёмного расхода компонент двухфазного продукта, извлекаемого из нефтяной или газоконденсатной скважины. Эта тематика активно разрабатывается в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН [1,2]. В предлагаемой работе рассматривается задача экспериментального определения объемного содержания газовой компоненты в двухфазном газо-жидкостном потоке в трубе.

Предложен и экспериментально апробирован метод определения объемной *концентрации* газовой фазы в газожидкостном потоке, основанный на использовании ультразвукового измерителя скорости потока жидкости в трубе расходомера (УЗИС), разработанного в Институте теплофизики СО РАН.

В УЗИС зондирование потока ультразвуковым импульсом с длиной волны λ=0,5 мм выполняется по всему сечению потока с частотой повторения 200 Гц. При каждом зондировании определяется задержка и уровень принятого сигнала, при этом достоверным принимается сигнал заданного уровня. По данным разности времени прохождения импульса вычисляется скорость потока и его объёмный расход. Введено понятие коэффициента прозрачности зондируемого потока для ультразвукового импульса, как отношение количества достоверных принятых импульсов n к количеству излученных импульсов (200 импульсов), выраженное в процентах: $Kg = (n/200)\cdot 100$. Для однородного потока жидкости Kg = 100%.

Газовая составляющая в виде пузырьков газа за счет рассеивания блокирует прохождение части импульсов. В этом случае происходит уменьшение коэффициента прозрачности. Предполагая, что для газожидкостного потока величина Kg зависит только от объемной концентрации газовой фазы Cv, и прокалибровав зависимость Kg = f(Cv) для конкретного УЗИС в газожидкостном потоке с известной объемной концентрацией газовой фазы, можно, используя эту калибровку, определять величину Cv в других газожидкостных потоках.

Для проверки работоспособности предложенного метода измерения величины Kg была проведена серия экспериментов на гидравлическом стенде ИТ СО РАН, дополнительно оснащенным оборудованием, позволяющим создавать в замкнутом контуре с проходным сечением

диаметром 50 мм воздухо-водяной поток с известной объемной концентрацией воздуха. Объемная концентрация воздуха, инжектированного в циркулирующий по замкнутому контуру водяной поток, определялась объёмным методом с использованием мерного бака с погрешностью dV< 0,5% в режиме непрерывной регистрации текущего время эксперимента, температуры потока, давления в контуре, средней скорость потока, текущее значение достоверных принятых ультразвуковых импульсов.

Предложены и реализованы методика и конструкция гидравлического стенда для калибровки измерителя коэффициента прозрачности в воздушно-водяном потоке.

Проведена калибровка УЗИС в воздушно-водяном потоке в диапазоне изменения объемной концентрации воздуха в потоке (0 – 19)%.

Полученные результаты позволяют утверждать, что предлагаемый метод измерения может быть использован для измерения объемной концентрации газовой фазы в газо-жидкостном потоке до значений порядка 30%.

Список литературы

1. **Мамонов В.Н., Серов А.Ф., Терехов В.И.**Экспериментальное исследование комплексного метода измерения массового расхода газо-жидкостных сред // Вестник Тюм.ГУ. Физ.-мат. моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2017. Т.3. №4. С. 65-81.
2. **Серов А.Ф., Назаров А.Д., Мамонов В.Н., Бодров М.В.** Принцип построения двухкомпонентного счетчика-расходомера для нефтяной скважины // Научный вестник НГТУ. 2012. Вып. 4. С. 176-182.

N.B. Miskiv, A.F.Serov, A.D. Nazarov, V.N. Mamonov

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

ULTRASONIC METHOD FOR DETERMINING THE GAS VOLUME IN A GAS-LIQUID FLOW

УДК 621.9

А.А. Сидоров, А.К. Ястребов

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

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕМНОЙ КОНДЕНСАЦИИ В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ СТУПЕНИ ТУРБОДЕТАНДЕРНОГО АГРЕГАТА

Турбодетандерный агрегат (ТДА) представляет собой лопастную машину для понижения температуры рабочего тела, проточная часть которой состоит из направляющего аппарата (НА), рабочего колеса (РК) и выходного диффузора (Д). В основе работы ТДА лежит процесс расширения рабочего тела в потоке с отводом энергии, при прохождении через НА и РК с совершением внешней механической работы [1].

Существующие методы расчетов ТДА не позволяют в полной мере учитывать фазовые переходы в проточной части ступени. Как правило, такие исследования проводятся лабораторно уже на стадии испытания готового образца, и могут привести к необходимости внесения изменений в конструкцию, либо к корректировке рабочих режимов, что негативно сказывается на экономике проекта и эффективности полученного прототипа.

Для исследования объемной конденсации был специально разработан интегрируемый в CFD-пакет модуль, основанный на решении кинетического уравнения для распределения капель по размерам [2]. Разработанный модуль в связке с расчетным пакетом позволяет определять области активной конденсации, определять количество образовавшихся капель, средний радиус с учетом их роста, а также другие интегральные характеристики конденсационного аэрозоля.

Цель настоящего исследования заключается в определении областей активной конденсации, влиянии процесса на изоэнтропийный КПД агрегата, а также в сравнении распределений давления по поверхности лопаток рабочего колеса с учетом конденсации и без него.

Рассматривается расширение двухкомпонентной парогазовой смеси в проточной части ТДА. В качестве неконденсирующегося компонента рассматривается гелий, в качестве конденсирующегося – пары азота. Содержание конденсирующегося компонента в смеси не превышает 5%, что позволяет использовать однотемпературную модель, в которой температура газовой фазы и капель принимаются равными [3]. На входе в ТДА задается полное давление, начальная температура и процентный состав смеси.

Задача решается методами CFD с использованием специально разработанного модуля для решения кинетического уравнения для функ-

ции распределения капель по размерам. Частота вращения РК определяется с помощью модуля Dynamic Mesh и заранее не задается. Вращение РК происходит за счет набегающего потока. Геометрия модели позволяет учитывать утечки и перетечки в проточной части, расчетная сетка построена с учетом пограничного слоя.

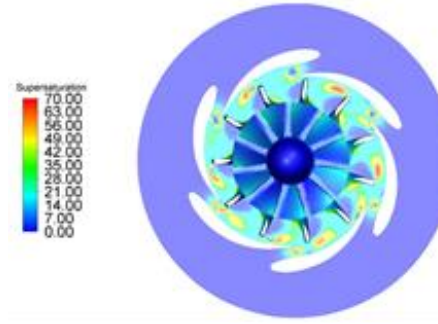


Рис. 1. Распределение степени пересыщения в поперечном сечении НА

В результате расчетов получены распределения давлений, температур, степени пересыщения (отношения давления пара к давлению насыщения), скорости нуклеации, а также числовой плотности капель. Определено влияние конденсации примеси на изоэнтропийный КПД ТДА. Сделаны выводы о нагрузке на лопатки РК в сравнении с расчетом без конденсации, а также о локализации областей активной конденсации – так, например, на рис. 1 представлено распределение степени пересыщения в поперечном сечении НА. Величина степени пересыщения выше 1 может говорить о высокой вероятности возникновения фазовых переходов в данной области.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90247.

Список литературы

1. **Давыдов А.Б., Кобулашвили А.Ш., Шерстюк А.Н.** Расчет и конструирование турбодетандеров. -М.: Машиностроение, 1987. – 232 с.
2. **Стернин Л.Е.** Основы газодинамики двухфазных течений в соплах. М.: Машиностроение, 1974 212 с.
3. **N.M. Kortsenshteyn, A.K. Yastrebov.** Interphase heat transfer during bulk condensation in the flow of vapor – gas mixture // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2012. Vol. 55. P. 1133 – 1140

A.A. Sidorov, A.K. Yastrebov

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

NUMERICAL STUDY OF BULK CONDENSATION IN THE FLOW SECTION OF A TURBO-DETANDER UNIT STAGE

УДК 536.242

Д.В. Кузнецов[1], *А.Н. Павленко*[1]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева,[(•)]

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ АЗОТА НА КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ ПОКРЫТИЯХ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ 3D ПЕЧАТИ

На сегодняшний день одним из важных и актуальных вопросов теплофизики является проблема повышения теплоотдачи и увеличения критических тепловых потоков в многофазных системах с фазовыми переходами за счет кипения, испарения и конденсации. Большое внимание в данной области уделяется исследованию влияния различных типов модификаций теплоотдающих поверхностей таких, например, как механическая обработка [1], создание микро/нано пористых покрытий [2, 3].

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование влияния структурированного капиллярно-пористого покрытия, полученного методом аддитивной 3D печати [4], на теплообмен и критические тепловые потоки при кипении жидкого азота в условиях свободной конвекции при атмосферном и пониженном давлениях. В качестве рабочих участков использовалась гладкая медная пластина и пластина с покрытием, представляющим собой упорядоченные пористые гребни и каналы.

Получены кривые кипения и критические тепловые потоки для гладкого и модифицированного нагревателей при давлении 0.1 и 0.018 МПа. Показано что наличие данного типа структурирования приводит к существенному изменению интенсивности теплообмена и характеру зависимости теплового потока от перегрева стенки, а также приводит к увеличению критического теплового потока (до 50%) относительно гладкого участка для исследованных приведенных давлений. Интенсивность теплообмена при пузырьковом кипении азота на участке с покрытием, полученным методом 3D печати, лежит значительно выше во всем диапазоне тепловых нагрузок вплоть до кризиса теплоотдачи на гладком нагревателе как при атмосферном, так и при пониженном давлениях. При этом наблюдается тенденция снижения интенсификации теплообмена по мере увеличения мощности тепловыделения.

Была проведена высокоскоростная визуализация процесса кипения для обоих рабочих участков во всем исследованном диапазоне тепловых нагрузок. Как показал качественный анализ полученных данных

[(•)] Д.В. Кузнецов, Kuznetsov_9308@mail.ru

для обоих давлений, в области тепловых потоков q < 1 Вт/см^2 плотность активных центров парообразования на нагревателе с покрытием существенно превышает аналогичную величину для гладкого участка, при этом кипение реализуется преимущественно в порах регулярных гребней покрытия.

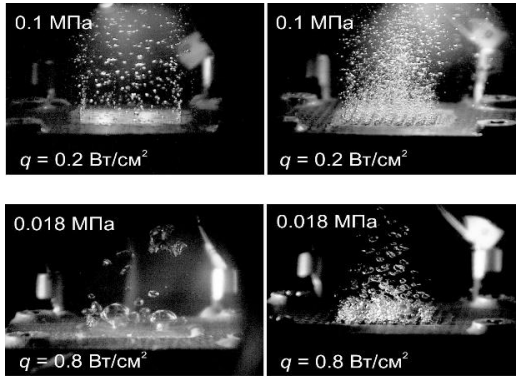


Рис. 1. Кадры кипения азота на гладком (слева) и структурированном (справа) нагревателях.

На основе данных видеосъемки получены размеры отрывных диаметров пузырей в области малых тепловых потоков, которые составили (0.1 – 0.3) мм для модифицированного нагревателя, (0.4 – 0.7) мм для гладкого нагревателя при атмосферном давлении и (0.5 – 1.5) мм, (1.2 – 4.5) мм при пониженном давлении соответственно.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (Грант № 19-19-00180).

Список литературы

1. **Volodin O.** et al. Surface microstructures for boiling and evaporation enhancement in falling films of low-viscosity fluids // IJHMT. 2020. Т. 155. С. 119722.
2. **Pavlenko A. N., Zhukov V. E., Slesareva E. Y.** Heat transfer at boiling on a vertical modified surface // JoP: Conference Series. – IOP Publishing. 2020. Т. 1677. №. 1. С. 012092.
3. **Bock B. D.** et al. Pool boiling of refrigerants over nanostructured and roughened tubes // IJHMT. 2020. Т. 162. С. 120387.
4. **В. П. Бессмельцев, А. Н. Павленко, В. И. Жуков.** Разработка технологии создания структурированных капиллярно-пористых покрытий методом 3D-печати для интенсификации теплообмена при кипении // Автометрия. 2019. Т. 55. №. 6. С. 25 – 35.

D.V. Kuznetsov [1], A.N. Pavlenko [1]

[1] Kutateladze Institute of Thermophysics, SB RAS,
630090, Russia, Novosibirsk, pr. Akad. Lavrent'eva 1

FEATURES OF HEAT TRANSFER DURING POOL BOILING OF NITROGEN ON CAPILLARY-POROUS COATINGS OBTAINED BY 3D PRINTING

УДК 536.244

Е.М. Старинская, Н.Б. Миськив, А.Д. Назаров, В.В. Терехов, В.И. Терехов

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Новосибирск, пр.Лаврентьева, 1 (•)

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ТЕПЛООБМЕН ПРИ ИСПАРЕНИИ КАПЕЛЬ НАНОЖИДКОСТИ

В последнее время актуальной является задача создания новых видов топлива для двигательных установок высокой мощности. Так, в традиционные жидкие топлива добавляют наночастицы различных материалов для улучшения производительности [1-2].

Наиболее сильные эффекты наночастицы могут оказывать в двухфазных газожидкостных системах и, особенно, при наличии фазовых превращений. В этом случае наночастицы, находящиеся на межфазной границе, оказывают существенное влияние на поверхностные силы, в результате чего сильно изменяется величина критических тепловых потоков и скорости парообразования при испарении наножидкостей по сравнению с чистыми жидкостями. Об этом свидетельствуют имеющиеся в литературе опытные данные [3].

В данной работе капля наножидкости с начальной комнатной температурой помещалась в воздушный поток при атмосферном давлении в диапазоне скоростей газа от 0 до 1 м/с. Также были проведены исследования по влиянию влажности окружающей среды на эффективность испарения капли наножидкости с концентрацией 0,1 % SiO_2 в условиях свободной конвекции (рис. 1).

В результате проведенного исследования обнаружено, что динамика температуры капли наножидкости 0,1 % SiO_2 для случая слабого обтекания (0,1 м/с) и в потоке 1 м/с значительно отличается от динамики в условиях свободной конвекции. Экспериментально установлено, что в неподвижном и слабоподвижном потоке воздуха динамика испарения капель наножидкости подобна динамике испарения капель бинарной жидкости с разной степенью летучести компонент.

Работы по изготовлению наножидкостей выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН. Исследование процесса испарения капель выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ КО_а № 20-58-10003.

(•) Е.М. Старинская, prefous-lm@yandex.ru

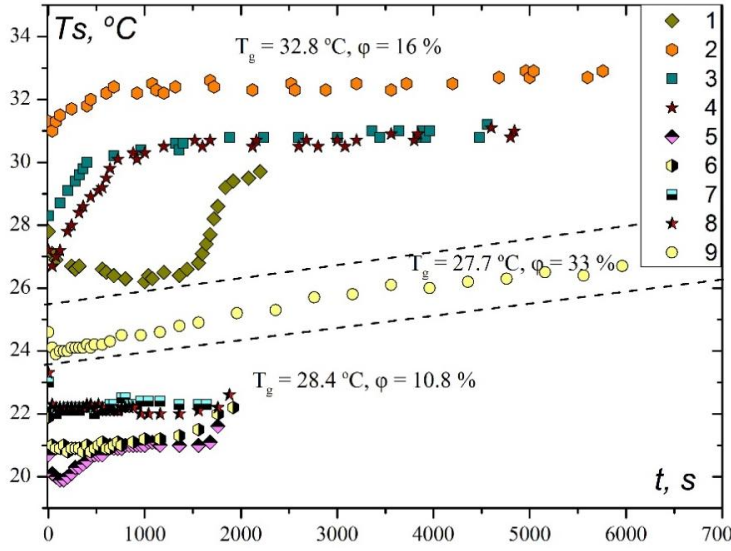


Рис. 1. Изменение температуры поверхности капли со временем. Обозначения: 1 – 4 наножидкость с концентрацией 0,1 % SiO_2 при $T_s = T_g = 32.8$ °C, φ = 16 %; 5 – 8 наножидкость с концентрацией 0,1 % SiO_2 при $T_s = T_g = 28.4$ °C, φ = 10.8 %; 9 – наножидкость с концентрацией 0,1 % SiO_2 при $T_s = T_g = 27.7$ °C, φ = 33 %.

Список литературы

1. **Das S.K., Choi S.U.S., Patel H.E.** Heat transfer in nanofluids – a review // Heat Transfer Eng. 2006. V.27. №10. pp. 3—19.
2. **Sefiane K., Bennacer R.** Nanofluids droplets evaporation kinetics and wetting dynamics on rough heated substrates // Adv. Coll. Interface. Sci. 2009. V.147–148. pp. 263–271.
3. **Shin D.H., Choi C.K., Kang Y.T., Lee S.H.** Local aggregation characteristics of a nanofluid droplet during evaporation // Int. J. Heat Mass Transf. 2014. V.72. pp. 336–344.

E.M. Starinskaya, N.B. Miskiv, A.D. Nazarov, V.V. Terekhov, V.I. Terekhov

Institute of Thermophysics SB RAS,
Russia, 630090, Novosibirsk, Lavrentiev Ave., 1

INVESTIGATION OF FACTORS AFFECTING THE HEAT TRANSFER IN EVAPORATION OF NANOFLUID DROPLETS

УДК 536.24

А.В. Ступакова, А.В. Дедов

Национальный Исследовательский Университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

РАСЧЕТ КРИТИЧЕСКОГО ТЕПЛОВОГО ПОТОКА ПРИ КИПЕНИИ В БОЛЬШОМ ОБЪЕМЕ НА МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Пузырьковое кипение является одним из наиболее эффективных способов теплоотвода от энергонапряженных поверхностей. Нанесение микропокрытий на поверхность позволяет увеличивать критический тепловой поток (КТП) в 2-3 раза по сравнению с гладкой поверхностью.

В работе [1] получена формула для расчета КТП на основании модели, учитывающей, что приток жидкости к границе сухого пятна обусловлен градиентом капиллярного давления. В модели обосновывается, что вблизи кризиса кипения, когда размер сухого пятна намного превосходит радиус равновесного парового зародыша и толщину жидкой макропленки δ_0, которая выступает в качестве основного характерного размера. Если процесс происходит на структурированной поверхности, то к градиенту давления за счет кривизны мениска пленки, добавляется градиент капиллярного давления в микроканалах. С ростом теплового потока на стенке толщина пленки уменьшается, а диаметр парового пузыря возрастает, происходит к необратимому росту размера сухого пятна, что определяет наступление кризиса теплообмена. Учитывая влияние микроструктуры, получена формула (1) для определения доли увеличения КТП на структурированной поверхности с регулярной морфологией относительно КТП на гладкой поверхности:

$$\frac{q_{\text{кр.пов}}}{q_{\text{кр}}} = \left(1 + \frac{k_1\left(\frac{\sigma}{\rho_G}\right)^{0.4}\left(\frac{\mu}{g\Delta\rho}\right)^{0.8}}{(a+s)^2}\right) \qquad (1),$$

где $q_{кр}$ – КТП на базовой (гладкой) поверхности; $q_{кр.пов}$ – КТП на структурированной поверхности.

Результаты сопоставления расчетов по (1) и экспериментальных данных показывают значительный разброс, достигающий 50%. Уравнение (1) позволяет оценить возможность увеличения КТП, для более серьезных выводов необходима апробация расчетов на большем массиве данных.

На рис. 1 представлены результаты расчетов КТП по (1), выполненные для ряда работ, где получены значения КТП на регулярных микроструктурированных поверхностях. На рисунке проведена аппроксимирующая прямая f(r), которая связывает экспериментальные данные и расчет по (1).

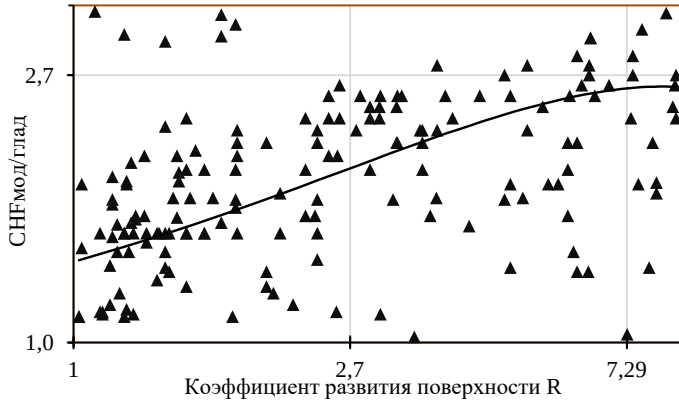


Рис. 1. Зависимость qкр.экспер/qкр.рассчет от R (коэффициент развития поверхности)

Список литературы

1. **Л.А.Сукомел, В.В.Ягов.** Возможности повышения критических тепловых потоков при кипенина поверхностях с пористыми покрытиями (обзор) \\ Вестник МЭИ, 2017. С. 55-67.
2. **Kuang-Han Chu, Ryan Enright, Evelyn N. Wang.** Structured surfaces for enhanced pool boiling heat transfer \\ American Institute of Physics, 2012. 5 с.
3. **Lining Dong, Xiaojun Quan, Ping Cheng.** An experimental investigation of enhanced pool boiling heat transfer from surfaces with micro/nano-structures.\\ International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013
4. **Navdeep Singh Dhillon, Jacopo Buongiorno, Kripa K. Varanasi.** Critical heat flux maxima during boiling crisis on textured surfaces \\ NATURE COMMUNICATIONS, 2015. С. 189-196.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 19-19-00410.

A.V.Stupakova, A.V. Dedov

National Research University “MPEI”,
Russia, 111250 Moscow, Krasnokazarmennaya, 14

CALCULATION OF THE CRITICAL HEAT FLOW DURING BOILING IN A LARGE VOLUME ON MICROSTRUCTURAL SURFACES

УДК 536.248.2

И.П. Малахов[1,2], В.С. Сердюков[1,2], А.С. Суртаев[1,2]

[1] Новосибирский Государственный университет,
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2
[2] Институт Теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБЕНА И ЛОКАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КИПЕНИЯ НА ГИДРОФОБНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ СУБАТМОСФЕРНЫХ ДАВЛЕНИЯХ

В последнее время огромное внимание вызывает вопрос, связанный с интенсификацией теплообмена при кипении за счет различных методов модифицирования поверхности. Одним из перспективных направлений является использование покрытий с различными свойствами смачивания, чему было посвящено большое количество исследований. Было показано, что использование гидрофобных покрытий снижает порог закипания, увеличивает количество центров нуклеации, но в то же время значительно снижает величину критического теплового потока. Однако влияние вышеописанных покрытий на особенности кипения жидкости в области субатмосферных давлениях практически не исследовано.

В данной работе было проведено исследование теплообмена, а также локальных характеристик кипения на гидрофобном покрытии в условиях субатмосферных давлений (от 0.08 до 1 атм) с использованием ИК и высокоскоростной видеосъемки [1]. Использование в работе специальной конструкции прозрачного нагревателя на основе сапфировой подложки позволило изучить с помощью высокоскоростной видеосъемки влияние давления на локальные характеристики процесса (Рис.1).

Было установлено, что при кипении на гидрофобном покрытии кривые кипения, полученные при различных давлениях, практически совпадают друг с другом, в то время как на гидрофильных поверхностях наблюдается ухудшение теплообмена с понижением давления [2]. При этом, в области низких тепловых потоков наблюдается интенсификация теплообмена по сравнению с гладкой поверхностью. Было показано, что длина контактной линии сидячих пузырей увеличивается с понижением давления. Также, было показано, что с понижением давления переход к пленочному кипению поверхности происходит при значительно более низких тепловых потоках.

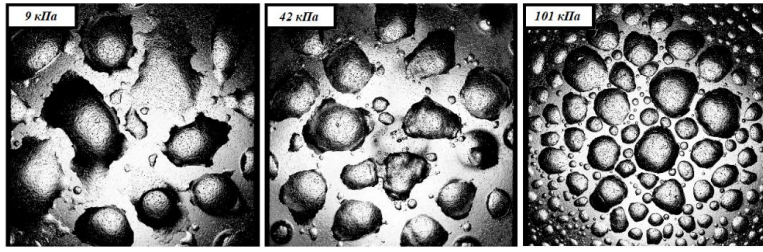


Рис. 1. Визуализация процесса кипения с нижней стороны прозрачного нагревателя при давлениях 9, 42, 101 кПа (q = 16 кВт/м^2).

Список литературы

1. **Surtaev A., Serdyukov V., Malakhov I.** Effect of subatmospheric pressures on heat transfer, vapor bubbles and dry spots evolution during water boiling //Experimental Thermal and Fluid Science. – 2020. – Т. 112. – С. 109974.
2. **Ягов В.В., Городов А.К., Лабунцов Д.А.** Экспериментальное исследование теплообмена при кипении жидкостей при пониженных давлениях в условиях свободного движения//ИФЖ. 1970. Т. 18. №4. С. 624-630.

Исследование выполнено в рамках проекта РФФИ 20-58-46008

I.P. Malakhov [1,2], A.S. Surtaev [1,2], V.S. Serdyukov [1.2]

[1] Novosibirsk State University,
630090, Novosibirsk, st. Pirogova, 2
[2] Institute of Thermophysics named after S.S. Kutateladze SB RAS,
630090, Novosibirsk, Academician Lavrentiev Ave., 1,

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER AND LOCAL CHARACTERISTICS OF BOILING ON A HYDROPHOBIC SURFACE UNDER SUBATMOSPHERIC PRESSURE

УДК 51-72, 51-74, 532.542.3, 533.17

А.Л. Тукмаков[1, 2], *С.Н. Арсланова*[1], *Н.А. Тукмакова*[1]

[1] Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, 420111, Казань, К. Маркса, 10
[2] ИММ - обособленное структурное подразделение ФИЦ КазНЦ РАН, 420111, Казань, Лобачевского, 2/31

ТЕЧЕНИЕ ПОЛИДИСПЕРСНОЙ ПАРОКАПЕЛЬНОЙ СМЕСИ В КАНАЛЕ СОПЛА ВЕНТУРИ

Работа посвящена исследованию гидро- и термодинамики полидисперсной парокапельной смеси в канале сопла Вентури. Устройство используется, в частности, для диспергирования жидкости в инжекторных агрегатах. Другое применение связано с очисткой запыленных газов, содержащих мелкодисперсные трудноизвлекаемые из потока частицы, равновесные по скорости с несущей средой.

Для описания движения полидисперсной смеси с несущей паровоздушной средой применяется модель многоскоростного многотемпературного континуума [1, 2]. Движение несущей двухкомпонентной односкоростной среды описывается системой уравнений Навье-Стокса для вязкого сжимаемого теплопроводного газа [3] с двумя уравнениями неразрывности – для газовой и паровой компоненты, уравнениями сохранения составляющих импульса смеси и уравнением сохранения тепловой энергии. Каждая дисперсная фаза описывается системой уравнений, куда входят уравнение неразрывности для средней плотности дисперсной фракции, уравнения сохранения компонент импульса, уравнение сохранения тепловой энергии. Системы уравнений для описания движения несущей среды и дисперсной фазы учитывают межфазный обмен массой, импульсом и энергией. Системы уравнений записываются в обобщённых криволинейных координатах и решаются явным методом Мак-Кормака второго порядка с расщеплением пространственного оператора по направлениям и со схемой нелинейной коррекции. Движение полидисперсной парогазокапельной смеси моделируется с учётом процессов дробления [4, 5], коагуляции, нагрева и испарения капель, конденсации пара [6, 7].

На рис. 1 показана геометрия расчётной области, представляющей собой осесимметричное сопло (а) и пространственное распределение давления двухкомпонентной смеси (б). Дисперсная фаза образована пятью фракциями капель воды с начальными размерами R = 1, 10, 20, 50 и 100 мкм. Начальная температура капель и несущей среды составляет T = 300 К. Начальная скорость потока составляет 45 м/с.

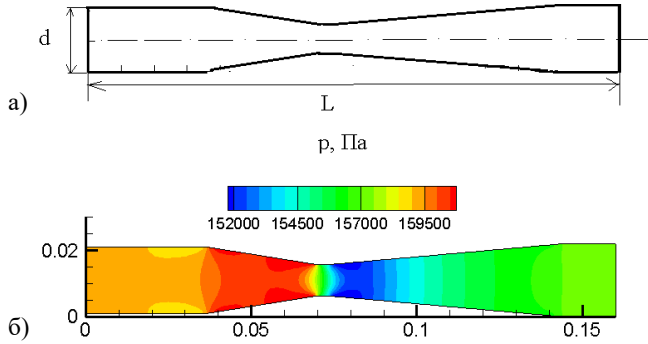


Рис. 1. Геометрия расчётной области (а), пространственное распределение давления двухкомпонентной смеси (б).

Список литературы

1. **Рахматулин Х.А.** Основы газодинамики взаимопроникающих движений сжимаемых сред // ПММ. 1958. Т. 20. № 2. С. 391.
2. Математическое моделирование волновых процессов в аэродисперсных и порошкообразных средах / А.Г. Кутушев. СПб.: Недра, 2003. 283 с.
3. **Steger J.L.** Implicit Finite-Difference Simulation of Flow about Arbitrary Two-Dimensional Geometries // AIAA J. 1978. No. 7. P. 679—686.
4. **Арефьев К.Ю., Воронецкий А.В.** Моделирование процесса дробления и испарения капель нереагирующей жидкости в высокоэнтальпийных газодинамических потоках // ТиА. 2015. № 5. С. 609—620.
5. **Тукмакова Н.А., Тукмаков А.Л.** Модель динамики полидисперсной парокапельной смеси с газодинамическим дроблением капель // ИФЖ. 2019. № 6. С. 2511—2519.
6. **А.Л. Тукмаков, Н. А. Тукмакова** Динамика полидисперсной парокапельной смеси с учётом дробления, коагуляции, испарения капель и конденсации пара // ТВТ. 2019. Т. 57. № 3. С. 437—445.
7. **А.Л. Тукмаков, В.Г. Тонконог, Н.А. Тукмакова** Гидро- и термодинамика полидисперсной парокапельной смеси канале регазификатора-подогревателя сжиженного природного газа // ТиА. 2020. Т. 27. № 2. С. 281—296.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям в рамках НИР по договору № 15754ГУ/2020.

A.L. Tukmakov[1, 2], *S.N. Arslanova*[2], *N.A. Tukmakova*[1]

[1] Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI,
Russia, 420111 Kazan, K. Marx, 10

[2] IME - Subdivision of FIC KazanSC of RAS,
Russia, 420111 Kazan, Lobachevsky, 2/31

FLOW OF THE POLYDISPERSED VAPOR-DROPLET MIXTURE THROUGH A VENTURI NOZZLE

УДК 536.248.2

В.С. Сердюков[1,2], *А.С. Суртаев*[1,2], *И.П. Малахов*[1,2], *А.С. Сафаров*[1,3]

[1] Новосибирский государственный университет,
Новосибирск, 630090, ул. Пирогова, 2
[2] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 1
[3] Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
Иркутск, 664033, ул. Лермонтова, 130 (•)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВСКИПАНИЯ НЕДОГРЕТОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИИ

На сегодняшний день кипение недогретой до температуры насыщения жидкости находит практическое применение в широком спектре приложений: в различных системах охлаждения, включая системы термостабилизации компонент силовой и микроэлектроники, в металлургии, атомной энергетике и др. Еще одним приложением, в котором реализуется процесс вскипания недогретой жидкости, является технология разрушения различных патологических образований путем введения оптоволокна в данную область и лазероиндуцированного нагрева биологической жидкости [1]. Однако, несмотря на то, что данная технология уже находит частное применение в медицинской практике, возможность ее широкого использования ограничивается недостаточным пониманием условий и режимов вскипания биологической жидкости в зависимости от длительности импульса и мощности тепловыделения, а также их влиянием на генерацию однофазных и двухфазных струйных течений при импульсном лазерном нагреве.

В настоящей работе лазероиндуцированное вскипание на торце оптоволокна моделировалось путем электрического нагрева прозрачного ITO микронагревателя (0.8x1 мм^2), напыленного на сапфировую подложку. Использование такой конструкции дало уникальную возможность не только визуально регистрировать пузырь на стадии его роста и конденсации, но и измерить температуру поверхности на момент появления пузырей с использованием ИК-термографии.

В качестве рабочей жидкости в экспериментах была использована вода при начальной температуре 27, 38 и 51°C. Мощность тепловыделения в опытах составила 3.6-41 Вт, длительность импульса тепловыделения – 100-2000 мс. Видео визуализация проводилась с нижней и боковой сторон нагревателя при частоте съемки до 100 кГц. Для измерения нестационарного температурного поля микронагревателя в работе была

(•) В.С. Сердюков, vsserd@gmail.com

использована высокоскоростная термографическая камера с частотой съемки 1 кГц.

В результате проведенных опытов был получен обширный массив видеоданных по динамике роста и конденсации паровых пузырей при различных начальных условиях ([2]). На основе его анализа были определены времена ожидания вскипания и времена развития конвекции. Было обнаружено, что развитие конвекции в жидкости на момент вскипания оказывает существенную роль на появление и эволюцию пузырей.

Также были построены зависимости максимального диаметра пузырей от теплового потока и начальной температуры и показано, что измеренные значения совпадают с диаметрами пузырей, формирующихся на торце оптоволокна при лазероиндуцированном вскипании [1, 3]. Показано, что плотность теплового потока оказывает значительное влияние на скорость роста пузырей, их времена жизни и максимальные размеры перед конденсацией. С использованием ИК-съёмки и численного моделирования были построены кривые роста температуры поверхности тепловыделения и определены температуры вскипания при импульсном нагреве недогретой воды. Анализ полученных данных показал, что данная величина для исследованных режимов лежит в диапазоне 245-275°C.

Полученные в работе результаты могут быть использованы в дальнейшем для разработки научных основ выбора оптимальных инструментов и параметров лечения с использованием лазероиндуцированного вскипания.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского Научного Фонда (проект № 19-19-00122).

Список литературы

1. Чудновский В.М., Майор А.Ю., Юсупов В.И., Жуков С.А. Лазероиндуцированное кипение биологических жидкостей // ТВТ. 2019. Т. 57. № 4. С. 578-587.
2. Surtaev A., Serdyukov V., Malakhov I., Safarov A. Nucleation and bubble evolution in subcooled liquid under pulse heating // Int. J. Heat and Mass Transf. 2021. V. 169. P. 120911.
3. Минаев В.П. и др. Теплоперенос в воде при лазерном нагреве через световоды для эндовенозной лазерной коагуляции // Квант. электр. 2020. Т. 50. № 8. С. 793-800.

V.S. Serdyukov[1,2(•)], *A.S. Surtaev*[1,2], *I.P. Malakhov*[1,2], *A.S. Safarov*[1,3]

[1] Novosibirsk State University, Novosibirsk, 630090, Pirogov str., 2
[2] Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS,
Novosibirsk, 630090, Lavrentiev ave., 1
[3] Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, 664033, Lermontov str., 130

INVESTIGATION OF THE SUBCOOLED LIQUID BOILING DURING PULSE HEATING

УДК 621.9

П.П. Ткаченко, С.С. Кропотова, Н.Е. Шлегель, П.А. Стрижак,

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск, 634050, Ленина, 30 (•)

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССОВ СОУДАРЕНИЙ КАПЕЛЬ ВОДЫ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГАЗОВОЙ СРЕДЕ

В связи с тем, что процессы соударений капель реализуются во многих промышленных системах, особый интерес представляет анализ таких процессов с выделением основных закономерностей и изучение влияния на их интегральные характеристики группы основных факторов. На сегодняшний день известны результаты экспериментальных и теоретических исследований влияния на характеристики процессов столкновений капель скоростей их движения, размеров, угла атаки, компонентного состава жидкостей и др. Основное внимание традиционно принято уделять характеристикам вторичных капель, так как они иллюстрируют эффективность процесса измельчения исходных. Вторичное измельчение капель может быть реализовано за счет соударений капель с твердой поверхностью (стенкой) [1], при движении в газовом потоке с высокой скоростью [2], вследствие перегрева капель до условий вскипания и микро-взрывной фрагментации [3], а также за счет их столкновения между собой [4,5]. Изучению последнего подхода уделяется особое внимание, так как его принято считать менее затратным по сравнению с другими.

Определены интегральные характеристики процессов соударений капель воды в высокотемпературной газовой среде на основе результатов экспериментальных исследований. Выделялось четыре режима взаимодействия: отскок, коагуляция, дробление и разлет. Для проведения экспериментальных исследований использовался стенд с системой индукционного нагрева. Регистрация процессов соударения капель воды выполнялась высокоскоростной видеокамерой Phantom Miro M310.

С увеличением температуры газовой среды (в диапазоне 20–700 °С) значение соотношения между продольными и поперечными размерами капель в течение времени их существования довольно резко уменьшается. Зарегистрировано существенное снижение данного соотношения с течением времени для всего исследованного диапазона температур. с ростом температуры газовой среды от 20 °С до 700 °С снижается результирующая скорость взаимодействия капель при идентичных начальных параметрах их генерации.

(•) П.П. Ткаченко, ppt1@tpu.ru

Установлено, что с увеличением температуры газовой среды от 20°С до 80°С смещается граница перехода к режиму дробления на 27 % в направлении меньших значений числа Вебера. Отмечено, что при температуре газовой среды выше 100 °С проявляются две области отскока на карте режимов B(We) от 0 до 10 и от 30 до 50. При дальнейшем увеличении температуры до 700 °С выявлено снижение значений критических чисел Вебера для режима дробления капель и их рост для коагуляции. Определено, что чем выше температура нагрева, тем меньше больше становится отношение площадей поверхности вторичных и исходных капель после дробления (рис.1).

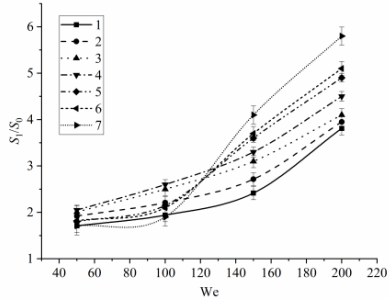


Рис. 1. Отношение площадей поверхности вторичных и исходных капель при соударениях в условиях разных температур нагрева: *1* – 20 °С; *2* – 80 °С; *3* – 100 °С; *4* – 200 °С; *5* – 300 °С; *6* – 500 °С; *7* – 700 °С.

.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 18–71–10002.

Список литературы

1. **Breitenbach J. и др.** Characterization of secondary droplets during thermal atomization regime // Experimental Thermal and Fluid Science. 2018. (98). С. 516–522.
2. **Cao X.-K. и др.** A new breakup regime of liquid drops identified in a continuous and uniform air jet flow // Physics of Fluids. 2007. № 5 (19). С. 57103.
3. **Avulapati M. M. и др.** Experimental understanding on the dynamics of microexplosion and puffing in ternary emulsion droplets // Fuel. 2019. (239). С. 1284–1292.
4. **Krishnan K. G., Loth E.** Effects of gas and droplet characteristics on drop-drop collision outcome regimes // International Journal of Multiphase Flow. 2015. С. 171–186.
5. **Post S. L., Abraham J.** Modeling the outcome of drop–drop collisions in Diesel sprays // International Journal of Multiphase Flow. 2002. № 6 (28). С. 997–1019.

P.P. Tkachenko, S.S. Kropotova, N.E. Shlegel, P.A. Strizhak

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

PROCESSES CHARACTERISTICS OF WATER DROPS COLLISION IN A HIGH TEMPERATURE GAS ENVIRONMENT

УДК 532.5

Д.В. Антонов[1], *П.А. Стрижак*[1]

[1] Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, 634050, Ленина, 30

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МИКРО-ВЗРЫВА В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ КАПЛЯХ

Хорошо известно, что диспергирование и микро-взрыв многокомпонентных капель приводит к быстрому распаду родительской капли с образованием большого количества вторичных капель, иногда даже позволяет получить мелкодисперсный аэрозоль, благодаря чему площадь поверхности испарения родительской капли возрастает в 100 – 200 раз [1]. Это способствует повышению эффективности большой группы технологий, среди которых особенно выделяются топливные технологии [2]. Целью настоящей работы является моделирование процессов микро-взрыва в многокомпонентных каплях при высокотемпературном нагреве.

Самые современные модели процессов микро-взрыва основаны на методе прямого численного моделирования [3, 4]. Основная проблема применения этих моделей [3, 4] заключается в том, что результаты вычислений сильно зависят от начальных условий, которые иногда невозможно с высокой точностью определить в эксперименте. Инженеры, работающие с эффектами микро-взрыва, как правило, не используют такие сложные модели [3, 4], описывающие подробности того, что происходит внутри фрагментирующей капли. С практической точки зрения важны значения времени задержки микро-взрывного распада [2].

Для решения задачи по определению значений времен задержки микро-взрывного распада была разработана упрощенная модель [5], позволяющая адекватно прогнозировать эти значения в широком диапазоне температур, давлений окружающей среды, начальных размеров и компонентного состава капель. Схема разработанной модели микро-взрыва представлена на рис. 1.

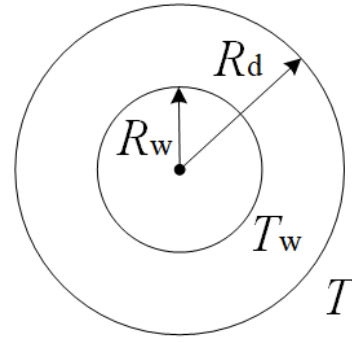


Рис. 1. Схема разработанной модели микро-взрыва [5]: R_d – радиус многокомпонентной капли, R_w – радиус водяного ядра, T_s – температура поверхности капли, T_w – температура на границе вода/горючий компонент.

Разработанная модель микро-взрыва основана на предположении, что ядро-вода сферически симметрично относительно оболочки топлива (рис. 1). Процессы нагрева и испарения многокомпонентной капли описываются с применением аналитического решения уравнения теплопроводности для температуры внутри капли вода/горючий компонент в зависимости от расстояния от ее центра и времени [5]. В качестве критерия микро-взрыва использовано достижение температуры кипения (или нуклеации) химически инертного компонента (воды) на границе вода/горючий компонент.

Результаты проведенных теоретических исследований хорошо согласуются с результатами экспериментальных исследований по изучению времен задержек микро-взрывного распада [1], рассогласование составляет не более 10-15 %. При этом чем меньше начальные размеры капель (менее 200 мкм) и выше температура окружающей среды (более 1000 К), тем рассогласование между результатами уменьшаются до 1-3%. Полученные результаты теоретических исследований в сравнении с экспериментальными данными [1] могут быть использованы при оптимизации технологий впрыска перспективных топлив в камеры сгорания двигателей и энергетических установок.

Работа выполнена при финансовой поддержке стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам (СП-447.2021.1).

Список литературы

1. **Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A., Rybdylova O., Sazhin S.S.** Micro-explosion and autoignition of composite fuel/water droplets // Combust. Flame. 2019. 210. P. 479—489.
2. **Watanabe H., Harada T., Matsushita Y., Aoki H., Miura T.** The characteristics of puffing of the carbonated emulsified fuel // Int. J. Heat Mass Transfer. 2009. 52. P. 3676—3684.
3. **Shinjo J., Xia J., Ganippa L.C., Megaritis A.** Physics of puffing and micro-explosion of emulsion fuel droplets // Phys. Fluids. 2014. 26. 103302.
4. **Shinjo J., Xia J., Megaritis A., Ganippa L.C., Cracknell R.F.** Modeling temperature distribution inside an emulsion fuel droplet under convective heating: A key to predicting micro-explosion and puffing // At. Sprays. 2016. 26. P. 551—583.
5. **Sazhin S.S., Bar-Kohany T., Nissar Z., Antonov D., Strizhak P.A., Rybdylova O.D.** A new approach to modelling micro-explosions in composite droplets // Int. J. Heat Mass Transfer. 2020. 161. 120238.

D.V. Antonov[1]*, P.A. Strizhak*[1]

[1] National Research Tomsk Polytechnic University,
Russia 634050 Tomsk, Lenina avenue, 30

MODELLING OF MICRO-EXPLOSION EFFECTS IN COMPOSITE DROPLETS

УДК 532.5.011

Е.А. Кожухова[1], *Н.Н. Кожухов*[1], *В.И. Ряжских*[1],
А.М. Наумов[1], *А.В. Нетреба*[1]

[1]Воронежский государственный технический университет,
г. Воронеж, 394006, ул. 20-летия Октября, 84

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА В НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ

Изучению поведения неньютоновских жидкостей при различных условиях работы теплотехнологических установок посвящено множество работ, основополагающими из которых являются [1-3]. Это связано с существенной зависимостью реологических свойств жидкости от скорости ее сдвига. Изменение температуры среды еще более усложняет прогнозирование ее поведения, а, следовательно, и режимов работы теплотехнических систем, использующих неньютоновские среды.

Длины начального гидродинамического участка для таких сред и для обычных сред, подчиняющихся закону Ньютона, отличаются. Процесс теплообмена в среде на начальном участке в литературе рассматривается в меньшей степени, так как это связано прежде всего с тем, что длина такого участка достаточна мала, а основной процесс проходит в гидродинамически установившейся области после него. И это так и есть для ньютоновских сред. В случае неньютоновской среды, длина начального участка может быть гораздо больше, и в этом случае уже нельзя не учитывать закономерности отличные от области установившегося течения, т.е. после начального участка. К тому же это может влиять на выпускаемую продукцию или даже на работу всего промышленного предприятия.

Для анализа гидродинамической картины рассмотрим сечение трубы в которой течет неньютоновская среда с некоторой задаваемой на входе начальной скоростью. Во многом течение неньютоновских сред определяется их реологическими характеристиками, которые были определены ранее [4]. Для определения начального гидродинамического участка будем использовать анализ профиля скорости, образованный частицами второй фазы, представляющей из себя ньютоновскую среду (акварельная краска). В планируемом в дальнейшем экспериментальном исследовании можно будет сравнивать полученный профиль в модели с установившемся профилем скорости капелек краски для различных режимов и отрезков времени.

Задача рассматривалась в нестационарной постановке для ламинарного режима течения жидкости. Частицы краски принимались как капельная жидкость, а их объемная доля составляла менее 1 %. Влияние частиц на основной поток принималось незначительным.

Решение состояло из двух этапов. На первом этапе решалась задача течения неньютоновской жидкости в стационарной постановке при ламинарном режиме течения. На втором – задача о движении частиц капельной ньютоновской жидкости в основном потоке неньютоновской жидкости в нестационарной постановке. Для расчетов использован пакет инженерного анализа, основанный на численном решении дифференциальных уравнений гидродинамики. Результаты моделирования представлены на рис. 1.

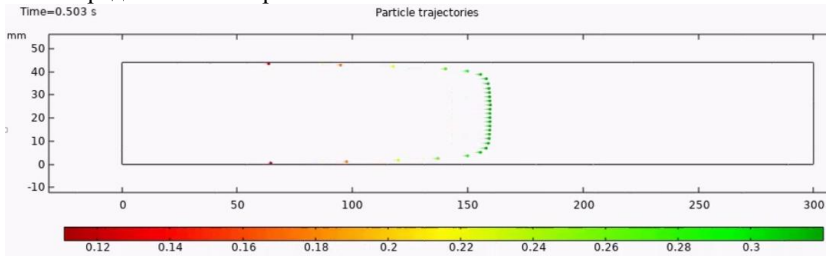


Рис. 1. Профиль скорости неньютоновской жидкости, образованный частицами

Построенная модель позволяет оценивать время формирования начального участка и его длину для ньютоновских сред с различными реологическими характеристиками. Из рис. 1 видно, что некоторое количество частиц с течением времени задерживаются в пограничном слое канала. А на длине около 150 мм профиль скорости является сформировавшимся.

Список литературы

1. Non-newtonian flow in the process industries: fundamentals and engineering applications / R.P. Chhatra, J.F. Richardson. Oxford: Butterworth – Heinemann, 1999. 436 p.
2. The rheology handbook: for user of rotational and oscillatory rheometers. 2nd revised edition / T. G. Mezger. Hannover: Vincentz Network, 2006. 298 p.
3 **Mashelkar R.A.** Hydrodynamic entrance-region flow of pseudoplastic fluids // Heat and Fluid Flow. 1975. V.5. №1. P. 683-690.
4. **Кожухова Е.А.** Экспериментальное исследование теплофизических и реологических характеристик водного раствора поверхностно-активных веществ // Политехнический вестник. Серия инженерные исследования. ТТУ им. Академика М.С. Осими № 3(51). 2020. С. 19-24.

E.A. Kozhukhova[1], N.N. Kozhukhov[1], V.I. Ryazhskikh, A.M. Naumov, A.V. Netreba

[1]Voronezh State Technical University, Voronezh, 394006, 20-letya Oktyabrya, 84

SIMULATION OF TWO-PHASE FLOW HYDRODYNAMICS IN A NONNEWTONIAN LIQUID

УДК 532.529: 536.24

Ф.В. Роньшин[1], *Ю.А. Дементьев*[1], *Д.Ю. Кочкин*[1], *К.С. Элоян*[1], *И.С. Вожаков*[1]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1 (•)

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПУЗЫРЕЙ В МИНИКАНАЛЬНЫХ СМЕСИТЕЛЯХ

Микрофлюидика занимается управлением жидкостями и частицами в масштабе от десятков до сотен микрометров и предоставляет значительное преимущество по сравнению с обычными макромасштабными системами: уменьшение объема образца и реагента, быстрая обработка, высокая чувствительность, низкая стоимость, портативность, а также возможность интегрирования и автоматизирования технологий. В настоящее время разрабатывается множество микрофлюидных устройств: датчики расхода, клапаны, системами обработки жидкостей для химического анализа, насосы, разделительные и смешивающие каналы, детекторы химических веществ и т.д. Поскольку разрабатываемые системы становятся все более сложными, возрастает потребность как в теоретической, так и в экспериментальной работе, а также в улучшенных инструментах моделирования.

При помощи метода DLP созданы миниканальные смесители с различным углом подвода газа и жидкости относительно оси миниканала. Угол подвода в исследуемых смесителях изменялся от 30° до 150°. Высота и ширина миниканалов составляли 1 мм. Проведено экспериментальное исследование формирования двухфазного течения, где в качестве жидкости использовалась вода Milli-Q, а в качестве газа - азот высокой чистоты. Исследование проводилось в широком диапазоне расходов газа и жидкости. Определены основные режимы течения и построена режимная карта. Определено 5 характерных режимов течения для миниканалов с T- и Y-смесителями, показанные на рисунке 1: параллельный (parallel), снарядный (slug или taylor), пузырьковый (bubbly), вспененный (churn) и снарядно-кольцевой (slug-annular). Визуализирован переходной режим - пузырьково-снарядный (bubbly-slug). Для визуализации использовался скоростной теневой метод, позволяющий четко визуализировать межфазную границу. Разработан алгоритм в среде matlab, анализирующий полученные изображения. В процессе обработки программа следует за каждым пузырем, тем сам определяя такие динамические величины, как скорость, его длина и длина жидкостной перемычки. В результате обработки данные выво-

(•) Ф.В. Роньшин, f.ronshin@gmail.com

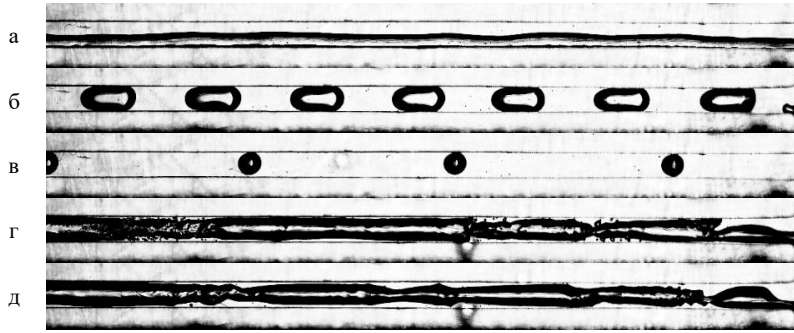


Рис. 1. Режимы течения в исследуемом миниканале с Т-смесителем. Режимы течения: (а) параллельный (parallel), (б) снарядный (slug или taylor), (в) пузырьковый (bubbly), (г) вспененный (churn) и (д) снарядно-кольцевой (slug-annular).

дятся в файл, где для каждого пузыря во времени приводятся измерения. Из полученных обработанных построены распределения размеров и скоростей пузырей, а также размеров жидкостных перемычек. Построена режимная карта, проведено сравнение с корреляцией Haase et al. (2019) [1] для определения границы перехода между пузырьковым и снарядным режимами течения. Показано хорошие количественное и качественное соответствие экспериментальных точек и корреляции. Исследовано влияние угла подвода в указанных смесителях. Показано, что угол подвода оказывает существенное влияния на границы режимов течения, а также на длины газовых снарядов и жидкостных перемычек.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-31-70038.

Список литературы

1. **Haase S., Bauer T., Graf E.** Gas–Liquid Flow Regime Prediction in Minichannels: A Dimensionless, Universally Applicable Approach //Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2020. – Vol. 59. – №. 9. – P. 3820-3838.

F.V. Ronshin [1], Yu.A. Dementyev [1], D.Yu. Kochkin [1], K.S. Eloyan [1], I.S. Vozhakov [1]

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

STUDY OF BUBBLE FORMATION IN MINI-CHANNEL MIXERS

СЕКЦИЯ 4

Сложный тепломассообмен и пористые среды

УДК 536.2

А.В. Аттетков, К.А. Гайдаенко, А.В. Котович

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
(Национальный исследовательский университет),
Москва, 105005, 2-ая Бауманская, 5 стр. 1

ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ ДВУХФАЗНОГО ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА С ПОГЛОЩАЮЩИМИ ПРОНИКАЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ВКЛЮЧЕНИЯМИ В ВИДЕ ШАРОВОГО СЛОЯ

Предложена математическая модель процесса теплопереноса в двухфазном пористом материале, содержащем поглощающие проникающее излучение включениями в виде шарового слоя (регулярная ячеистая схема). Реализуемая математическая модель представляет собой смешанную задачу для системы уравнений в частных производных второго порядка параболического типа при наличии теплового источника в системе. Отмечены трудности, возникающие при аналитическом решении рассматриваемой задачи с применением интегрального преобразования Лапласа по временной переменной. Для преодоления возникших трудностей с использованием общей теории интегральных преобразований разработано конечное интегральное преобразование по пространственной переменной для двуслойной области. Его применение позволяет представить искомое температурное поле объекта исследований в аналитически замкнутом виде.

Представленные результаты показывают, что при проведении параметрического анализа изучаемого температурного поля могут возникать значимые технические трудности, обусловленные сложным характером зависимости ядра и спектра собственных значений разработанного интегрального преобразования от параметров исходной модели. В связи с этим целесообразно, используя исходную математическую модель как базовую, разработать иерархию ее упрощенных аналогов с последующим определением диапазона возможного применения каждого из них.

Список литературы

1. **Аттетков А.В., Волков И.К., Гайдаенко К.А.** Процессы теплопереноса в твердом теле с поглощающим проникающее излучение включением в виде шарового слоя // ТПТ. 2020. Т. 12. № 1. С. 18 – 24.
2. **Аттетков А.В., Волков И.К., Гайдаенко К.А.** Автомодельные процессы теплопереноса в прозрачном для излучения твердом теле с поглощающим включением в виде шарового слоя // ТПТ. 2020. Т. 12. № 5. С. 219 – 224.

A.V. Attetkov, K.A. Gaydaenko, A.V. Kotovich

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

TEMPERATURE FIELD OF TWO-PHASE POROUS MATERIAL WITH SPHERICAL ABSORBING INCLUSIONS PENETRATING RADIATION

УДК 536.24

Н.А. Нигай, С.В. Сыродой

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

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ НА УСЛОВИЯ СУШКИ ВЕТОК ЛИСТВЕННЫХ ПОРОД ДРЕВЕСИНЫ

В последние десятилетия значимость изучения процессов тепломассопереноса, протекающих при дегидратации древесной биомассы, существенно возросла. Это обусловлено, в первую очередь, перспективами использования древесины в энергетике в качестве основного топлива или добавки к углю [1]. Для снижения влагосодержания в древесине до приемлемого (по условиям сжигания) уровня в настоящее время применяется, как правило, сушка в газовой среде при температурах $313 \le T_g \le 373$ К [2]. Одним из наиболее оптимальных вариантов энергетического использования биомассы является сжигание типичных отходов жизнедеятельности леса или лесного горючего материала (ЛГМ - листовой и хвойный опад, сухостой, сухая трава, ветки и др) в топках паровых и водогрейных котлов ТЭС. Кроме того, жёсткая экологическая политика ведущих мировых держав создает предпосылки все более активного использования биомассы в производстве тепловой и электрической энергии [3].

Целью данной работы является установление (по результатам эксперимента) закономерностей процессов дегидратации типичных лесных горючих материалов (ветки липы, берёзы и тополя) и анализ влияния вида биомассы на интегральные характеристики в условиях радиационно-конвективного нагрева.

На рисунке 1 приведены зависимости времен сушки веток различных пород древесины от температуры внешней среды. Можно отметить существенно нелинейный (экспоненциальный) характер зависимостей $\tau_d(T_g)$. Это обусловлено значимым) влиянием процесса испарения влаги на динамику влагоудаления.

Анализ зависимостей (рис. 1) показывает, что времена сушки веток берёзы больше аналогичных времен других исследовавшихся видов древесной биомассы. Это, скорее всего, связано с низкой температуропроводностью берёзы по сравнению с тополем и липой. В результате ветки берёзы прогреваются значительно медленнее других видов древесной биомассы. Это приводит к торможению всего процесса дегидратации.

Установленные по результатам выполненных экспериментов закономерности дают основания для вывода о том, что в условиях низко-

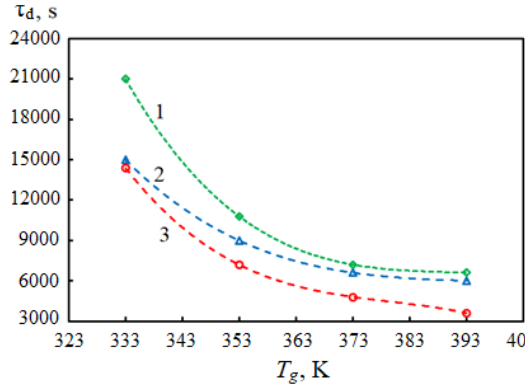


Рис. 1. Зависимости времён дегидратации древесной биомассы от температуры окружающей среды для трёх исследовавшихся видов биомассы: 1 – ветки берёзы; 2 – ветки липы; 3 – ветки тополя.

температурного нагрева влажной древесной биомассы механизм влагоудаления существенно отличается от общепринятых закономерностей процесса сушки. По результатам проведенных экспериментов сформулирована гипотеза (существенно отличающаяся от известных) о механизме процесса влагоудаления из веток лиственных деревьев.

Список литературы

1. **Shen D.K., Gu S., Luo K.H., Bridgewater A.V.** Analysis of wood structural changes under thermal radiation // Energy Fuel. 2009. Vol. 23, №2, P. 1081-1088.
2. **Saidur R., Abdelaziz E.A., Demirbas A., Hossain M.S., Mekhilef S.** A review on biomass as a fuel for boilers // Renew. Sustain. Energy Rev. 2011. Vol. 15, P. 2262-2289.
3. **Braimakis, K., Magiri-Skouloudi, D., Grimekis, D., Karellas, S.** Energy-exergy analysis of ultra-supercritical biomass-fuelled steam power plants for industrial CHP, district heating and cooling. Renewable Energy, 2020, 154, 252-269.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00226).

N.A. Nigay, S.V. Syrodoy

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

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF AMBIENT TEMPERATURE ON THE CONDITIONS OF DRYING OF HARDWOOD

УДК 532.517.45

И.В. Деревич[1], *А.К. Клочков*[1]

[1] Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, 2-ая Бауманская, 5

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ФУНКЦИИ ПЛОТНОСТИ ВЕРОЯТНОСТИ ПАРАМЕТРОВ ЧАСТИЦ В ВЯЗКОЙ СРЕДЕ С УЧЕТОМ БИМОДАЛЬНОГО ПОТЕНЦИАЛА

Исследование двухфазного турбулентного движения частиц в вязкой среде с учетом бимодального потенциала основано на Эйлеровом подходе описания сплошной среды. Функция плотности вероятностей (ФПВ) распределения параметров дисперсной фазы содержит всю информацию о параметрах процесса. Целью исследования является расчёт нестационарной ФПВ распределения параметров частиц в каждый момент времени.

Уравнения динамики в потенциальном поле рассматриваются, когда влияние частиц на турбулентность и столкновения частиц между собой пренебрежимо малы.

$$\begin{cases} \dfrac{dX_p(t)}{dt} = V_p(t) \\ \dfrac{dV_p(t)}{dt} = \dfrac{1}{\tau}\left[U\left(X_p(t),t\right) - V_p(t)\right] - \left.\dfrac{d\Omega(x)}{dx}\right|_{x=X_p(t)} \\ X_p(0) = X_p^{(0)},\ V_p(0) = V_p^{(0)} \end{cases}, \qquad (1)$$

здесь X_p, V_p – координаты и скорости частиц соответственно; τ – время динамической релаксации (рассматривается в приближении Стокса $\tau = const$); $U\left(X_p(t),t\right)$ – флуктуации скорости газа , которые на траектории частице есть $\tilde{U}(t)$ и моделируются стационарным случайным процессом Гаусса с нулевым средним и дисперсией $\langle U^2 \rangle$.

Функция $\Omega(x)$ – потенциал вида

$$\Omega(x) = a\frac{x^2}{2} + в\frac{x^3}{3} + c\frac{x^4}{4}.$$

Пример решения системы (1) стохастических обыкновенных дифференциальных уравнений (СОДУ) с заданным потенциалом см. рис. 1.

Получено уравнения для ФПВ распределения параметров частиц:

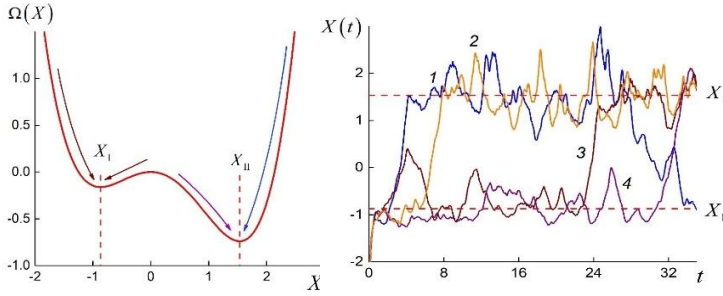


Рис. 1. Пример случайных траекторий решения системы (1) в бимодальном потенциале с параметрами *a=-1, b=-0.5, c=0.25*: потенциал (слева) и координата частицы (справа).

$$\frac{\partial\Phi(X,V,t)}{\partial t}+V\frac{\partial\Phi(X,V,t)}{\partial X}-\frac{\partial}{\partial V}\left\{\frac{\mathrm{d}\Omega(X)}{\mathrm{d}X}\Phi(X,V,t)\right\}=$$
$$=\frac{1}{\tau}\frac{\partial V\Phi(X,V,t)}{\partial V}+\frac{\langle U^2\rangle}{\tau}f(X,t)\frac{\partial^2\Phi(X,V,t)}{\partial V^2}+g(t)\langle U^2\rangle\frac{\partial^2\Phi(X,V,t)}{\partial X\,\partial V} \quad (2)$$

где $\Phi(X,V,t)$ – функция плотности вероятностей параметров движения частицы; $g(t), f(X,t)$ – функции отклика.

Для верификации решения уравнения для ФПВ (2) используется прямое численное моделирование. Результаты качественно и количественно сопоставляются с решением уравнения (2). Полученная нестационарная ФПВ параметров частицы позволяет в любой момент времени получить распределение параметров и их вероятностные характеристики.

Список литературы

1. **Зайчик Л. И., Алипченков В. М.** Статистические модели движения частиц в турбулентной жидкости. Москва: Физматлит, 2007.
2. **Деревич И. В., Клочков А. К.** Аналитическое и численное решение уравнения для функции плотности вероятности скорости частиц в турбулентном потоке / Инженерно-физический журнал. – Т. 93, № 5. – С. 1081-1092.

Работа поддержана фондом РФФИ, проект №20-08-01061.

I.V. Derevich [1], A.K. Klochkov[1]

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

MODELING OF THE NON-STATIONARY PROBABILITY DENSITY FUNCTION OF PARTICLE PARAMETERS IN A VISCOUS MEDIUM WITH THE BIMODAL POTENTIAL

УДК 536.24

К.В. Кочнев[1]

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В СИМУЛЯТОРЕ ЛУННОГО РЕГОЛИТА

В статье рассматривается вопрос математического моделирования процессов теплообмена, происходящих при спекании симулятора лунного реголита под действием концентрированного солнечного излучения. Данная работа является частью большого исследования, направленного на создание технической системы, способной перерабатывать реголит в строительный материал для возведения объектов лунной инфраструктуры.

Необходимость разработки математической модели процессов, происходящих при спекании реголита, объясняется невозможностью проведения полноценных натурных экспериментов, которые бы учитывали все основные факторы лунной среды. Из-за ограниченного количества настоящего лунного реголита, доставленного на Землю, в математической модели, в качестве исходных данных, взяты характеристики симулятора лунного реголита, изготавливаемого из земных материалов.

Анализ работ, проведенных в мире по тематике спекания реголита, показал, что основными важными факторами, влияющими на прочность полученных образцов, являются плотность упаковки, распределение частиц в смеси по размеру и среда, в которой происходит спекание. Без предварительного уплотнения смеси образец, полученный после спекания, оказывается хрупким из-за малых зона контакта между спеченными частицами. При спекании реголита в воздушной среде кислород вступает в химические реакции с минеральными составляющими и образует новые фазы на границе зерен, толщиной до 1 мкм, что снижает сцепление между зернами. Также необходимо учитывать отсутствие естественной эрозии в лунных условиях, в результате чего частицы реголита имеют примерно в восемь раз большую плотность поверхности, чем совокупность сфер с таким же распределением по размерам.

В экспериментах, проводимых на солнечных концентраторах, диаметр пятна сфокусированного света составляет порядка 20 мм, что значительно больше размера каждой отдельной частицы.

Целью математического моделирования процесса спекания является установление режима обработки реголита, при котором обеспечива-

ется надежное сцепление частиц между собой в одном слое и между соседними слоями.

Формулируемая математическая модель приводится к стандартному виду, необходимому для проведения расчетов в программе ANSYS Transient Thermal.

В качестве базы для построения математической модели спекания реголита взята аддитивная технология селективного лазерного сплавления (СЛС) порошковых материалов. Однако, несмотря на схожесть принципов, существуют важные различия. Одним из них является отношение диаметра луча подводимой энергии к размеру частицы. Если в технологии СЛС диаметр лазерного луча может быть в два раза больше размера частицы, то диаметр пятна концентрированного солнечного света, нагревающий поверхность реголита в сто раз больше размера частицы.

Список литературы

1. **Кочнев К. В.** Технологии обработки лунного реголита для последующего использования / К. В. Кочнев, А. В. Ненарокомов // Тепловые процессы в технике. 2020. Т. 12. №6. С. 242-251.
2. **Богданович В. И.** Математическое моделирование процессов плавления порошка в технологии селективного лазерного сплавления / В. И. Богданович, М. Г. Гиорбелидзе, А. В. Сотов [и др.] // Известия Самарского научного центра РАН. 2017. Т. 19. № 4 (1). С. 105—114.

Работа была выполнена в рамках гранта РФФИ № 20-08-01174 А.

K.V. Kochnev [1]

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

MODELING OF HEAT EXCHANGE IN THE LUNAR REGOLITH SIMULATOR

УДК 536.33

В.П. Зинкевич[1]

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

МЕХАНИЗМ ВЛИЯНИЯ СЖАТИЯ СЛОЕВ ЭКРАННО-ВАКУУМНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ НА ПЛОТНОСТЬ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА

Основным принципом работы экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ) является снижение теплового потока за счет частичного отражения и переизлучения энергии каждым экраном (слоем). Однако на такую теплопередачу может оказывать влияние сжатие слоев, вызванное различными технологическими факторами, такими как, например, перегибы матов теплоизоляции при закрытии плоскими матами пространственной конструкции, установка металлизации, пришивка матов при установке и прижатие матов элементами конструкции космического аппарата. В данной работе рассматривается возможный механизм влияния сжатия слоев ЭВТИ на ее способность снижать плотность теплового потока, проходящего через теплоизоляцию. Данная работа является частью исследования по определению влияния внешнего механического воздействия на характеристики экранно-вакуумной теплоизоляции.

Анализ работ по теме радиационного теплообмена в ближней зоне показал, что тепловой поток значительно возрастает при вакуумных зазорах нанометрового размера между эмиттером и поглотителем. Это происходит за счет взаимодействия поверхностных поляритонов. При этом прирост теплового потока сильно зависит от расстояния между поверхностями. Тепловой поток возрастает и между металлическими поверхностями, и между многослойными структурами «металл-диэлектрик». ЭВТИ различных видов можно отнести к обеим этим категориям, поскольку для ее изготовления применяется как металлическая фольга, так и металлизированная полимерная пленка.

Экранно-вакуумная теплоизоляция теряет свои свойства при контакте слоев между собой. Однако даже без наличия контакта при перегибах или натяжении матов теплоизоляции при их установке на космический аппарат зазоры между слоями могут уменьшаться настолько, что на теплопередачу начинает оказывать влияние ближнее поле. Вследствие чего, под сжатым участком на солнечной стороне конструкция аппарата будет испытывать более сильный нагрев, а из-за наличия сжатых участков на теневой стороне повысятся тепловые потери. Это может влиять на работу чувствительной к температуре аппаратуры

и снижать срок службы криогенных установок на борту космического аппарата.

В таком случае, для первоначальной оценки изменения теплового потока сжатые участки ЭВТИ могут быть представлены, как набор плоских металло-диэлектрических (чаще всего на данный момент применяется ЭВТИ в виде металлизированных полимерных пленок) параллельных пластин с вакуумными зазорами шириной порядка микро- и нанометров в зависимости от плотности сжатия.

В настоящее время при теоретическом расчете ЭВТИ не учитывается влияние возможного сжатия ее слоев при монтаже, поэтому такие расчеты требуют проверки тепловакуумными испытаниями после установки теплоизоляции на космический аппарат. Определение существенности влияния сжатой ЭВТИ на расчетный тепловой режим аппарата позволит проводить более точные проектные расчеты, уточнять уже готовые расчеты на этапе макетирования и изготовления матов и аналитически оценивать тепловые потери еще до этапа испытаний, а также даст возможность усовершенствования и сравнения различных технологий изготовления матов ЭВТИ.

Список литературы

1. **Малоземов В. В.** Тепловой режим космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1980. – 232 с.
2. **M. Lim, J. Song, S.S. Lee, B.J. Lee** Tailoring near-field thermal radiation between metallo-dielectric multylayers using coupled surface plasmon polaritons // Nat. Commun. – 2018. - №9, 4302 / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: https://doi.org/10.1038/s41467-018-06795-w

Работа произведена в рамках гранта РФФИ № 20-08-01174 А .

V.P. Zinkevich[1]

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

MECHANISM OF INFLUENCE OF MULTILAYER INSULATION LAYER COMPRESSION ON HEAT FLUX DENSITY

УДК 533.6.011.6

Т.В. Карпухина[1], *В.Н. Ковальногов*[1], *М.С. Бояркин*[1], *Р.В. Федоров*[1]

[1] Ульяновский государственный технический университет,
Ульяновск, 432027, ул. Северный Венец, 32

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОМАССОБМЕНА В КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ ТЕЛАХ В ПРИЛОЖЕНИИ К РАЗРАБОТКЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ БИОТОПЛИВ

В настоящее время одной из самых актуальных проблем, как для современной России, так и для всего мира, является поиск новых источников энергии. На мировом рынке возрастает интерес к альтернативным экологичным видам топлива, это обусловливает высокие темпы развития мирового рынка биотоплива. Одним из самых технологичных видов твердого биотоплива являются топливные гранулы (пеллеты), которые представляют собой прессованные изделия из древесных отходов, соломы, отходов сельского хозяйства.

В связи с этим, был разработан проблемно-ориентированный комплекс теории и программно-информационный комплекс, позволяющие моделировать и исследовать закономерности тепломассообмена и диффузии влаги и генераторного газа в капиллярно-пористом пространстве твёрдых биотопливных элементов.

В работе [1] приведены математическая модель, разностная аппроксимация дифференциальных уравнений, определяющих процесс тепломассопереноса влаги и газов в капиллярно-пористом теле, алгоритм расчета его параметров в процессе обогащения топлива. Задача формулируется и решается в нестационарной трехмерной постановке. Технологические параметры процесса моделируются при расчетах заданием граничных условий на каждой из поверхностей капиллярно-пористого тела.

Комплекс вопросов, связанных с математическим моделированием тепло- и массопереноса влаги и насыщения газом в капиллярно-пористом пространстве твердых биотоплив, рассмотрен в [2].

Коэффициент бинарной диффузии D_{cfl}, м^2/с определяли по выражению:

$$D_{cfl} = D_{cs}\left(T_{fl}/T_s\right)^{n_D}, \quad (1)$$

где T_{fl} - температура теплоносителя, К; T_s – базовая температура, К, n_D и D_{cs}– константы степенной зависимости коэффициента бинарной диффузии паров воды в теплоносителе D_c от температуры:

$$D_c = D_{cs}\left(T/T_s\right)^{n_D}. \quad (2)$$

Коэффициент теплопроводности $\lambda_{гfl}$, Вт/(м·К):

$$\lambda_{гfl} = \lambda_{гs}\left(T_{fl}/T_s\right)^{n_\lambda}, \quad (3)$$

где n_λ и $\lambda_{гs}$, Вт/(м·К) – константы степенной зависимости коэффициента теплопроводности теплоносителя $\lambda_г$ от температуры:

$$(\lambda_г = \lambda_{гs}\left(T/T_s\right)^{n_\lambda}). \quad (4)$$

Концентрация пара в греющем агенте для поверхности l капиллярно-пористого тела C_{fl}, кг/м^3

$$C_{fl} = \frac{p_{nfl}}{461{,}9T_{fl}}, \quad (5)$$

где p_{nfl} - парциальное давление пара в греющем агенте для поверхности l капиллярно-пористого тела, Па, T_{fl} - температуры греющего агента, К.

Программно-информационный комплекс может применяться для выработки рекомендаций по совершенствованию технологического процесса обогащения капиллярно-пористых тел и выбору оптимальных режимов эксплуатации оборудования.

Исследования выполнены при поддержке грантом Президента Российской Федерации по проекту НШ- 2493.2020.8.

Список литературы

1. **Kovalnogov, V.N., Karpukhina, T.V., Boyarkin, M.S.** Software and information complex for the coupled numerical solution of the equations of heat-and-moisture transfer and the studying of heat-and-humidity kinetics of biofuel cells // Journal of Numerical Analysis, Industrial and Applied Mathematics 13(1-2), pp. 1-5.
2. **Kovalnogov, V.N., Karpukhina, T.V., Boyarkin, M.S.** Development of the theory for modeling and research of advanced technologies for enriching biofuel cells with generator gases // Journal of Numerical Analysis, Industrial and Applied Mathematics 13(1-2), pp. 7-14.

T.V. Karpukhina[1], *V.N. Kovalnogov*[1], *M.S. Boyarkin*[1], *R.V. Fedorov*[1]

[1]Ulyanovsk State Technical University,
32 Severny Venets, Ulyanovsk, 432027, Russia

RESEARCH OF THE PROCESS OF HEAT AND MASS EXCHANGE IN CAPILLARY-POROUS BODIES IN APPLICATION TO THE DEVELOPMENT OF PERSPECTIVE BIOFUELS

УДК 66.046.7

М.И. Головченко, Е.Д. Матвеев, П.Г. Макаров, А.С. Дмитриев

Национальный исследовательский университет "МЭИ",
111250, Москва, Красноказарменная улица, дом 13

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАТЕРИАЛА ЗАСЫПКИ НА ЭФФЕКТ "ПРЫГАЮЩИХ ПУЗЫРЕЙ"

Данная работа является продолжением исследований, посвященных эффекту «прыгающих пузырей», который заключается в динамическом поведении пористой среды, где в процессе кипения принимают участие три фазы – жидкость, пар и твердые микросферы[1]. Существенное отличие данного явления состоит в том, что в отличие от классического случая кипения в пористой среде [2], когда ее материал всегда неподвижен относительно движущейся жидкости и пузырьков пара, в настоящей серии экспериментов пористая среда представляет собой отдельные твердые мезоскопические элементы – микросферы или гранулы.

Экспериментальная установка состоит из нагревательной плиты, на которую сверху помещается емкость с жидкостью (дистиллированная вода) с мелкодисперсной засыпкой твердых частиц, лежащих на дне контейнера. При помощи погружной термопары производится измерение температуры жидкости на разных уровнях.

В работе исследовано поведение мезоскопических частиц, выполненных из разных материалов и отличающихся по форме. Металлические микросферы были выполнены из сплава Pb95%+Sb5% и имели диаметр от 250 до 400 мкм. Кроме того, было исследовано поведение двух видов пластмассовых гранул – из поливинилхлорида (PVC) плотностью 1,35 г/см³ и из полиэтилентеленфталата (PET) плотностью 1,4 г/см³. Оба вида гранул имели геометрическую форму, приближенную к параллелепипеду или кубу. Характерный размер PVC гранул варьировался от 0,4 мм до 0,7 мм, а PET гранул – 0,7 мм-1 мм.

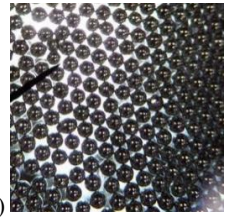
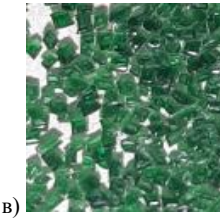
а)  б) в) 

Рис. 1 Различные варианты мезоскопической среды:
а) свинцовые микросферы; б) гранулы из PVC; в) гранулы из PET

Для всех видов засыпки качественно поведение при нагреве системы вода+гранулы было одинаковым – постепенное образование пузырей при температурах ниже температуры кипения, нарастание т.н. «бород» в виде одной или нескольких частиц вокруг пузырей, колебательное движение образовавшихся комплексов от дна емкости наверх и обратно без разрушения пузырей газа. Установлено, что типы взаимодействия комплекса «пузырь+гранула» отличаются в зависимости от материала гранул. На рис. 2 представлен график характерных температур для различных стадий наблюдаемых явлений.

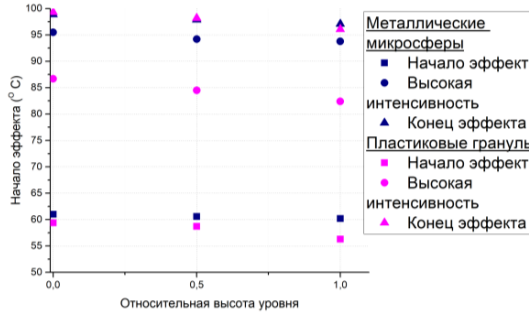


Рис. 2. Температура «свежей» дистиллированной воды для характерных стадий эффекта «прыгающих пузырей» на разных высотах столба жидкости

Практическое применение эффекта может быть полезно в области энергетики, например для ускорения кипения жидкостей, а также для термофлотации при разделении твердотельных мезоскопических засыпок**.**

Список литературы

1. **A.S Dmitriev, M. A. El Bouz, P. G. Makarov** A new regime of nucleate boiling in microsphere mesostructures: Jumping pool boiling. Technical Physics Letters, March 2015, Volume 41, Issue 3, pp. 288-290
2. **С.С. Кутателадзе**. Основы теории теплообмена; Издательство Атомиздат, 1979, 416 с.

M.I. Golovchenko, Ye.D. Matveev, P.G. Makarov, A.S. Dmitriev

National Research University “MPEI”
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya, 13

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF “JUMPIUNG BOILING” AFFECTED BY THE MATERIAL OF MESOSCOPIC FILLING

УДК 629.786.2

Д.Р. Рамазанова[1]

[1] Московский авиационные институт
(Национальный исследовательский университет),
Москва, 125993, Волоколамское ш., 4

ТЕПЛОВОЙ АНАЛИЗ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ КРУПНОГАБАРИТНОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В ФОРМЕ ТОРА

В данной работе был проведен анализ и моделирование тепловых полей конструкции крупногабаритного космического аппарата (КА) в форме тора.

Развитие пилотируемых космических полетов продолжается, неизбежно будет расти продолжительность полета. Одной из важнейших научно-технических и медико-биологических проблем, связанных с освоением человечеством космического пространства, является проблема создания и поддержания оптимальных условий жизнедеятельности человека на протяжении всего космического полета. Обязательно для сохранения здоровья космонавтов в длительном полете необходимо решить проблему гравитации в космическом аппарате, и до сих пор эта проблема окончательно не решена.

Предлагаемое решение - свободный Тор большого диаметра (порядка 100м). Основные принципы предназначения и эксплуатации тора: КА следующего более крупного уровня по массогабаритам; КА, не способный к взлету и посадке на поверхность космических тел; обитаемый корабль для длительных полетов в открытом космосе (в пределах Солнечной системы); максимальная замкнутость циклов функционирования систем; максимальное внедрение в Тор всех необходимых жизненно важных систем; максимальное создание рабочих мест на вращающемся торе.

Существует необходимость в тепловом анализе конструкции для расположения на орбите под оптимальным углом, конструкции тепловой защиты оболочки и определить тепловые потоки.

Данный анализ позволяет на основе трехмерной модели КА определить положение КА на орбите для разных режимов, спрогнозировать изменение тепловых характеристик.

В результате были получены распределения температур конструкции КА для режима переохлаждение и перегрев.

При моделировании были введены следующие допущения: тепловые потоки от внутренних источников равны нулю, тепловой поток Солнца постоянный, в качестве геометрии использовался тор.

Список литературы

1. Петрова Г.И., ред. Моделирование тепловых режимов КА и окружающей его среды. Москва, Машиностроение, 1971, 382 с.
2. Малоземов В.В. Тепловой режим космических аппаратов. М., 1980.

D.R. Ramazanoova [1]

[1] Moscow Aviation Institute,
Russia 125993 Moscow, Volokolamskoe st, 4

THERMAL ANALYSIS OF A ROTATING LARGE-SIZED SPACE VEHICLE IN THE SHAPE OF A TORUS

УДК 629.7.064.5

О.М. Алифанов[1], *В.В. Ильин*[1], *А.Г. Викулов*[1], *А.В. Ненарокомов*[1], *А.В. Моржухина*[1]

[1] Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)», 125993, Москва, Волоколамское шоссе, 4

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Перспективные электроэнергетические генераторы и связанные с ними системы передачи электрического тока основаны на высокотемпературных (ВТСП) сверхпроводниках, работающих, тем не менее, при криогенных температурах [1]. Взаимосвязь теплопроводности и электропроводности полупроводника до перехода в сверхпроводящее состояние выражается законом Видемана-Франца-Лоренца [2], после – электрическое сопротивление становится равным нулю, и число Лоренца материала теряет физический смысл. Явление сверхпроводимости имеет место в строго определённом диапазоне температуры, поэтому зависит от теплофизических свойств – теплопроводности и теплоёмкости. Прямая пропорциональность между ними наблюдается вплоть до окрестности абсолютного нуля, но переменный коэффициент пропорциональности, как правило, неизвестен [3].

При построении виртуальной теплофизической модели необходимо учитывать зависимость теплопроводности и теплоёмкости от температуры. Идентификация свойств подробной математической модели с плотной объёмной или поверхностной сеткой затруднена большим количеством узлов и связанных с ними уравнений, поэтому целесообразно использовать двухмодельный метод, ставя в соответствие основной модели упрощённую. Упрощённая модель может быть одномерной или в сосредоточенных параметрах [4-5].

Для отработки алгоритмов идентификации нет необходимости проводить натурный эксперимент. Упрощённая модель идентифицируется по результатам виртуального эксперимента, воспроизводящего реальные условия. Таким образом, проектные расчёты эксперимента могут проводиться даже при неизвестных свойствах материалов.

Для идентификации одного вектора-столбца неизвестных свойств, число которых не превышает количества уравнений, необходим вектор экспериментальных функций температур от времени с таким же количеством компонент. Модели с сосредоточенными параметрами являются квазилинейными из-за отсутствия явной зависимости свойств от температуры – свойства зависят явно только от времени. Однако, при наличии временной

зависимости экспериментальных температур не сложно перейти и к температурной зависимости свойств [6-7].

Упрощенная модель идентифицируется по экспериментальным данным и появляются температурные зависимости её свойств, определённых по виртуальной и реальной модели. Для каждой температуры находится коэффициент, равный частному свойств, идентифицированных по двум моделям. Этот коэффициент является поправкой, на которую необходимо умножить соответствующее свойство имитационной модели для данной температуры. Сопоставление экспериментальных температурных полей и полученными по уточнённой имитационной модели позволяет сделать вывод об адекватности модели.

Построены подробная и промежуточная модели для катушки статора ВТСП-генератора, который проектируется для использования в опытной силовой криогенной энергосистеме автоматических космических аппаратов. Проведены проектные расчёты эксперимента, по которым идентифицирована упрощённая модель катушки.

Работа поддержана грантом Минобрнауки России № 075-15-2020-770.

Список литературы

1. Электромеханические преобразователи на основе массивных высокотемпературных сверхпроводников / Л.К. Ковалёв, К.Л. Ковалёв, С.М.-А. Конеев, В.Т. Пенкин, В.Н. Полтавец. – М.: МАИ-ПРИНТ, 2008. 440 с.
2. **Охотин А.С., Боровикова Р.П., Нечаева Т.В.** Теплопроводность твердых тел: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1964. С. 5-33.
3. **Новицкий Л.А., Кожевников И.Г.**, Теплофизические свойства материалов при низких температурах. Справочник. – М: Машиностроение, 1975. 216 с.
4. **Балаковский С.Л., Дилигенский Н.В.** О двухмодельном итерационном методе решения граничной обратной задачи теплообмена // ИФЖ. 1989. Т. 56. №2. С. 313-319.
5. **Балаковский С.Л.** Решение обратных задач теплообмена двухмодельным методом // ИФЖ. 1989. Т. 57. №3. С. 500-503.
6. **Викулов А. Г., Ненарокомов А. В.** Уточненное решение вариационной задачи идентификации математических моделей теплообмена с сосредоточенными параметрами // ТВТ. 2019. Т. 57. № 2. 234-245.
7. **Викулов А.Г., Ненарокомов А.В.** Параметрическая идентификация математических моделей теплообмена в космических аппаратах // ИФЖ. 2019. Т. 92. № 1. С. 32-45.

O.M. Alifanov[1], V.V. Ilyin[1], A.G. Vikulov[1], A.V. Nenarokomov[1], A.V. Morzhukhina[1]

[1] Moscow Aviation Institute (National Research University),
Russia, 125993, Moscow, Volokolamskoe shosse, 4

IDENTIFICATION OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF A HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTING CERAMIC MATERIAL

УДК 536.242, 532.72, 536.2.081.7

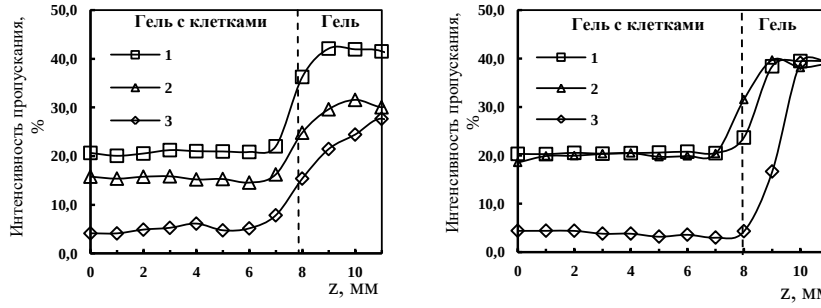
Н.С. Захаров[1, 2], *О.А. Сулягина*[1], *Е.В. Солнцева*[1], *А.А. Мошин*[1], *А.Ю. Терещук*[1]

[1] Московский политехнический университет, Москва, 107023, Большая Семеновская, 38
[2] Российский технологический университет, 119454, Москва, Вернадского, 78

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА В ГЕЛЕВЫХ СИСТЕМАХ С КЛЕТКАМИ

Возможность выращивания биологических тканевых структур и органов из стволовых клеток с помощью использования аддитивных 3D – технологий положила начало многочисленным исследованиям, направленным на развитие технологии 3D-биопринтинга и создание новых биоматериалов [1, 2]. По сравнению с 3D-печатью из неорганических материалов, в биопечати существуют усложняющие процесс факторы, связанные, в том числе, с выбором материала с требуемыми свойствами, в которых было бы возможно выращивание живых тканевых структур и биообъектов. Перспективными для биопечати материалами являются гелевые микроструктурированные материалы [3]. Создание и поддержание жизнеспособности сложных биологических систем предполагает постановку и решение новых фундаментальных задач, направленных на изучение, протекающих в них, закономерностей процессов тепло- и массопереноса. Наличие живых микроорганизмов в гелевой системе усложняет задачу и устанавливает ряд определенных требований при разработке таких живых биообъектов. Например, для выживаемости иммобилизованных микробиологических организмов в гелевые системы, необходимым условием является доставка питательных веществ и вывод продуктов клеточного метаболизма. В таких условиях реализация капиллярной сети каналов в проектируемых биореакторах представляет чрезвычайно важную задачу, требующую дополнительного исследования.

Представленные в данной работе материалы являются продолжением серии работ экспериментального моделирования переносных процессов в гелевых системах с иммобилизованными микроорганизмами (клетками). Исследования проводились как в однородных, так и в слоистых образцах, в том числе с искусственными микроканалами, моделирующими капилляры для доставки питательной среды в объем геля, где размещаются живые микроорганизмы. Экспериментальное изучение и диагностика микроструктуры дисперсных сред и гелей основано на применении оптических методик. Зондирование оптически прозрачных гелей волоконно-оптическими элементами путем пропускания света через исследуемый образец позволило проводить измере-



(а) (б)

Рис. 1. Зависимость интенсивности пропускания света от времени в двухслойных гелевых образцах:
(а) – образец с каналом, (б) – без канала,
1 – сразу после приготовления, 2 – через 24ч, 3 – через 48ч.

ние и регистрацию динамики формирования структуры гелей в режиме реального времени.

На рис.1 представлены некоторые результаты исследований по измерению интенсивности поглощения света в двухслойных гелевых образцах. Представленные графики отражают динамику роста клеток в гидрогелях.

Работа подготовлена в рамках выполнения части государственного задания ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет» (проект АААА-А20-120092190052-9).

Список литературы

1. Placzek M.R., Chung I.M., Macedo H.M., Ismail S., Mortera Blanco T., Lim M. Stem cell bioprocessing: fundamentals and principles // J. R. Soc. Interface. 2009. Vol. 6. P. 209-232.
2. Wang S., Lee J.M., Yeong W.Y. Smart hydrogels for 3D bioprinting // Int. J. Bioprint. 2015. Vol. 1. No. 1. P. 3-14.
3. Ozbolat I.T., Moncal K., Gudupati H. Evaluation of bioprinter technologies // Additive Manufacturing. 2017. Vol.13. P.179-200.

N.S. Zakharov[1,2], O.A. Sulyagina[1], A.A. Moshin[1], E.V. Solntceva[1], A.U. Tereschuk[1]

[1] Moscow Polytechnical University,
Russia, 107023, Moscow, Bolshaya Semenovskaya st. 38
[2] MIREA – Russian Technological University,
Russia, 119454, Moscow, Vernadsky Avenue 78.

RESEARCH OF TRANSFER PROCESSES IN GEL SYSTEMS WITH CELLS

УДК 621.565

Н.С. Иванов, Ю.А. Кузма-Кичта, А.В. Лавриков

Национальный исследовательский университет
Московский энергетический институт,
Москва, 111250, Красноказарменная, 17А (•)

ИССЛЕДОВАНИЕ СМАЧИВАНИЯ ПОКРЫТИЙ С РАЗЛИЧНОЙ СТРУКТУРОЙ

Капиллярные эффекты играют большую роль для современной энергетики. На тепловых станциях в конденсаторах благодаря гидрофобным покрытиям, нанесенным на трубки конденсатора, возможна капельная конденсация. В системах охлаждения микроэлектроники и термостабилизаторах необходимо повышать площадь испарения теплоносителя [1]. При формировании пористого гидрофильного покрытия на поверхности испарителя тепловой трубы высота капиллярного подъема жидкости увеличивается, что снижает термическое сопротивление тепловой трубы.

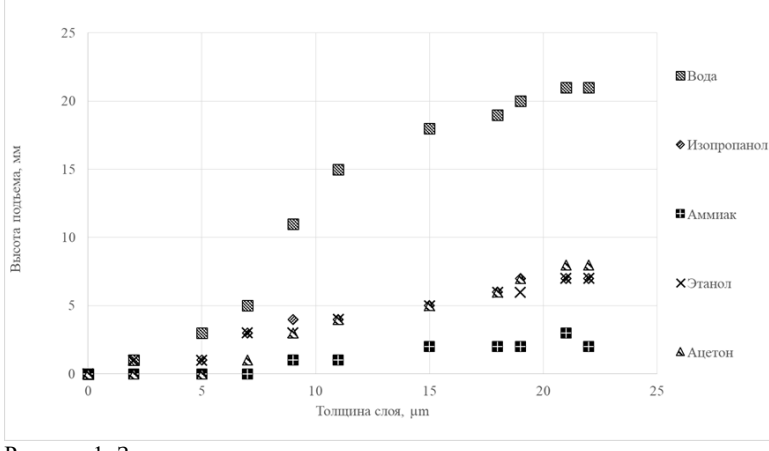


Рисунок 1. Зависимость высоты подъема жидкости от толщины пористого покрытия из наночастиц оксида алюминия.

В работе исследовались свойства гидрофобных и гидрофильных покрытий и их влияние на краевой угол и высоту подъема жидкости. В первой серии экспериментов установлено, что формирование пористого покрытия из наночастиц оксида алюминия [2] на поверхности стали с толщиной пористого слоя 20 микрон позволяет увеличить высоту

(•) Н.С. Иванов , IvanovNikS@mpei.ru

подъема жидкости на 25 мм по сравнению с поверхностью без покрытия. Также установлено, что высота подъема жидкости сильно зависит от физических свойств самой жидкости. Для легкокипящих жидкостей, таких как ацетон, аммиак и изопропанол, высота подъема меньше, чем для воды из-за высокой скорости испарения и низкой силы поверхностного натяжения. Результаты исследования показаны на рисунке 1.

В работе исследованы также гидрофобные покрытия для интенсификации конденсации на поверхности. Установлено, что формирование шероховатой текстуры на поверхности стали с помощью мелкодисперсных сферических шариков повышает гидрофобные свойства поверхности и позволяет достигнуть краевого угла 155 ˚. Тогда как для полированной стали получен краевой угол 35 ˚. На рисунке 2 показана фотография текстуры гидрофобной поверхности.

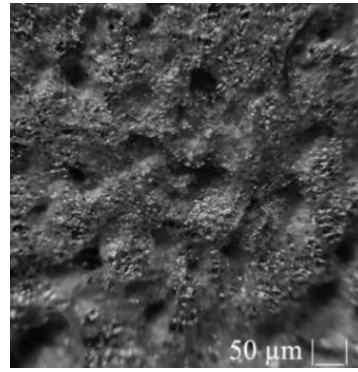


Рисунок 2. Гидрофобное покрытие на поверхности стали

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-08-01109

Список литературы

1. **Dzyubenko B.V., Kuzma-Kichta Ya. A., Leontiev A.I., Fedik I.I., Kholpanov L.P.**, «Intensification of Heat and Mass Transfer on Macro-, Micro-, and Nanoscales», Begell House, ISBN: 978-1-56700-284-3
2. **Кузма-Кичта Ю.А., Иванов Н.С., Лавриков А.В., Киселев Д.С.**, 2020. Патент № 2730921 «Способ получения наночастиц оксида алюминия»

N.S. Ivanov, Yu.A. Kuzma-Kichta, A.V. Lavrikov

National research university Moscow power engineering institute,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya, 14

STUDY OF WETTING COATINGS WITH DIFFERENT STRUCTURES

УДК 532.5

Е.А. Колчанова[1], *Н.В. Колчанов*[1]

[1] Пермский государственный национальный исследовательский университет, 614990, Пермь, Букирева, 15 (•)

ТИПЫ ВИБРОКОНВЕКТИВНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В СЛОЕ ЖИДКОСТЬ – ПОРИСТАЯ ЗОНА В ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЕ

В работе численно исследуются различные виды конвективных валов, возникающих в неоднородно нагретом горизонтальном слое жидкости, частично заполненном пористой средой. Слой совершает высокочастотные малоамплитудные колебания в продольном направлении в поле силы тяжести. Пористая среда делит его на два субслоя. Верхний жидкостный субслой свободен от пористой области и расположен над пористым субслоем, насыщенным жидкостью.

Определяется порог возбуждения осредненной тепловой конвекции при различных значениях вибрационного числа Рэлея-Дарси R_{mv}, пропорционального градиенту температуры и вибрационному ускорению. Показано, что при подогреве слоя снизу возможно три разных вида валиковой конвекции: локальная (Рис. 1 а), крупномасштабная (Рис. 1 б) и, так называемая, межфазная конвекция (Рис. 1 в). Первые два вида конвекции аналогичны конвективным течениям в поле силы тяжести в отсутствие вибрации [1, 2]. Они были впервые обнаружены экспериментально в работе [3], где с помощью жидкокристаллической пленки наблюдались длинноволновые валы, которые проникали в оба субслоя, и коротковолновые валы, локализовавшиеся, главным образом, в пределах жидкостного субслоя. При задании достаточно интенсивной вибрации помимо этих двух видов течений, реализуется еще третий, новый, вид конвекции – межфазная конвекция. Она возникает в виде «суперкоротковолновых» валов вблизи границы раздела жидкостного и пористого субслоев. Межфазная конвекция имеет термовибрационную природу и обнаруживается, когда вибрационное число Рэлея-Дарси значительно превышает обычное число Рэлея-Дарси. Схожая конвекция была впервые получена в системе «жидкость – пористая среда» с помощью продольных вибраций в условиях нулевой гравитации в работе [3]. Известно, что обычное гравитационное перемешивание в этом случае не работает, а течение можно создать, действуя на жидкость, например, продольной вибрацией.

Отметим, что с повышением вибрационного ускорения наблюдается смена видов конвекции в следующем порядке: локальная конвекция

(•) Е.А. Колчанова, kolchanovaea@gmail.com

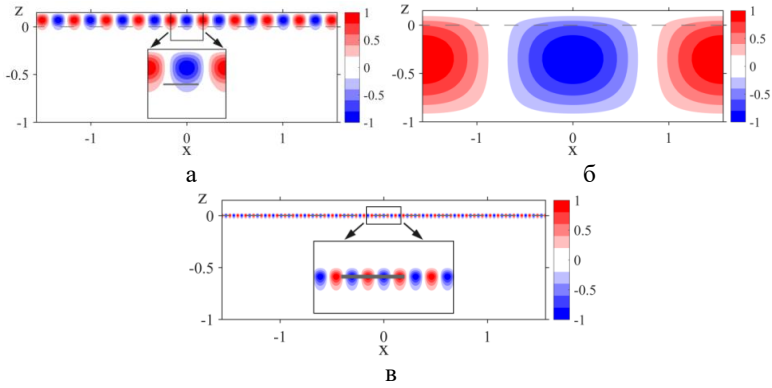


Рис. 1. Поле возмущений температуры для конвективных валов, возникающих вблизи порога устойчивости под действием продольной вибрации с различным вибрационным числом Рэлея-Дарси R_{mv}: *а* — 0, *б* — 0.5, *в* — 15.8. Горизонтальная штриховая линия показывает границу раздела жидкостного и пористого субслоев.

– крупномасштабная конвекция – межфазная конвекция. Критическое вибрационное число Рэлея-Дарси, соответствующее переходу к межфазной конвекции, уменьшается с ростом относительной толщины жидкостного субслоя.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-71-00067).

Список литературы

1. **Chen F., Chen C.** Experimental investigation of convective stability in a superposed fluid and porous layer when heated from below // J. Fluid Mech. 1989. Vol. 207. P. 311—321.
2. **Hirata S., Goyeau B., Gobin D., Carr M., Cotta R.** Linear stability of natural convection in superposed fluid and porous layers: influence of the interfacial modelling // Int. J. Heat Mass Transf. 2007. Vol. 50. P. 1356—1367.
3. **Kolchanova E.A.** Onset of thermal convection in a superposed fluid-porous layer subjected to high-frequency longitudinal vibration in weightlessness // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. Vol. 159. N. 120123. P. 1—9.

E.A. Kolchanova [1], *N.V. Kolchanov* [1]

[1] Perm State University,
Russia 614990, Perm, Bukireva, 15

VIBROCONVECTIVE INSTABILITIES IN A FLUID-POROUS LAYER IN GRAVITATIONAL FIELD

УДК 532.5

Е.А. Колчанова[1, 2], *Н.В. Колчанов*[1, 2]

[1] Институт механики сплошных сред УрО РАН,
614013, Пермь, Академика Королёва, 1
[2] Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Пермь, Букирева, 15 (•)

ВОЗНИКНОВЕНИЕ КОНВЕКЦИИ ПРИМЕСИ В АНИЗОТРОПНОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ С УЧЕТОМ ИММОБИЛИЗАЦИИ

Численно исследуется влияние процессов адсорбции и десорбции примеси на порог генерации концентрационной конвекции в системе двух пористых субслоев разной проницаемости. Субслои образуют единый слой пористой среды, анизотропной по своим фильтрационным свойствам в вертикальном направлении. В среде устанавливается равновесное распределение концентрации примеси при фиксированных ее значениях на внешних верхней и нижней границах. При таком равновесном распределении жидкость не движется. Нами проводится линейный анализ устойчивости этого состояния и определяется пороговое значение критерия подобия – концентрационного числа Рэлея-Дарси R_{m*}, при котором в среде будет возникать конвективное течение.

Перенос примеси через пористую среду описывается в рамках MIM модели (Mobile-Immobile media) [1, 2]. Примесь делится на две фазы: мобильную, которая переносится с несущей жидкостью, и немобильную, оседающую на пористую матрицу. Степень иммобилизации примеси характеризуется концентрационным коэффициентом вариации пористости P_φ, пропорциональным перепаду концентраций примеси в немобильной фазе на внешних границах анизотропной пористой среды.

При наличии сорбции примесь в немобильной фазе присоединяется к поверхности пор, тем самым, уменьшает их объём. Это обстоятельство снижает их проходимость и приводит к повышению порога возбуждения конвекции. На Рис. 1 мы наблюдаем рост критического числа Рэлея-Дарси с увеличением концентрационного коэффициента вариации пористости. Кроме того, виден излом кривых 4-6, появляющийся с ростом P_φ при отношении проницаемостей незагрязненных пористых слоев, превышающем значение 40. Этот излом связан со сменой вида конвекции: с локальной на крупномасштабную. Локальная конвекция формируется в виде валов в пористом субслое большей проницаемости. Крупномасштабная конвекция охватывает оба пористых субслоя.

(•) Е.А. Колчанова, kolchanovaea@gmail.com

Смена масштаба конвективных течений характерна для ситуации близких критических чисел Рэлея-Дарси, соответствующих двум разным минимумам бимодальной нейтральной кривой. Аналогичные кривые получаются и в случае свободной тепловой конвекции в слоистой пористой среде [3].

На наш взгляд, описанное влияние сорбции на смену вида конвекции от локальной к крупномасштабной объясняется зависимостью отношения проницаемостей субслоев в анизотропной среде от концентрационного коэффициента вариации пористости.

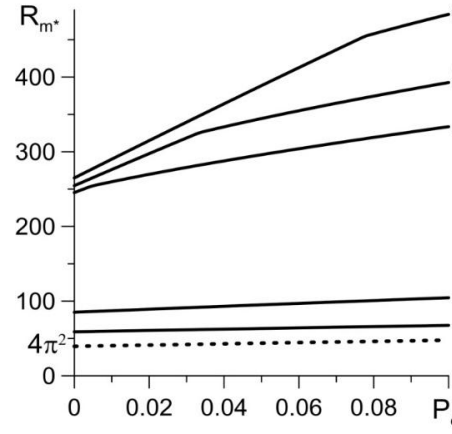


Рис. 1. Пороговое число Рэлея-Дарси в зависимости от концентрационного коэффициента вариации пористости при разных отношениях проницаемостей незагрязненных субслоев K_2/K_1: *1* — 0.1), *2* — 1, *3* — 10, *4* — 45, *5* — 55, *6* — 72.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-11-20125).

Список литературы

1. **Van Genuchten M. Th., Wierenga P. J.** Mass Transfer Studies in Sorbing Porous Media I. Analytical Solutions // Soil Science Society of America Journal. 1976. Vol. 40. P. 473–480.
2. **Maryshev B. S.** The effect of sorption on linear stability for the solutal Horton–Rogers–Lapwood problem // Transport in Porous Media. 2015. Vol. 109. P. 747–764.
3. **Leong J. C., Lai F. C.** Natural convection in rectangular layered porous cavities // J. Thermophys. Heat Transfer. 2004. Vol. 18. P. 457–463.

E.A. Kolchanova [1, 2], *N.V. Kolchanov* [1, 2]

[1] Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS,
Russia, 614013 Perm, Acad. Korolev, 1
[2] Perm State University,
Russia, 614990, Perm, Bukireva, 15

ONSET OF COMPOSITIONAL CONVECTION IN AN ANISOTROPIC POROUS MEDIUM WITH SORPTION

УДК 532.542

Н.Н. Кожухов[1], *Е.А. Кожухова*[1], *Д.А. Коновалов*[1], *Д.А. Прутских*[1], *В.И. Перунова*[1]

[1]Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, 394006, ул. 20-летия Октября, 84

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ЭЛЕМЕНТЕ С АНИЗОТРОПНОЙ ПОРИСТОСТЬЮ

Использование пористых элементов позволяет интенсифицировать процесс теплообмена в каналах энергетических установок, например, лопаток турбин, систем охлаждения электронных компонентов, систем спутниковой связи и многих других технических устройств, к которым предъявляются требования компактности и высокой тепловой эффективности [1, 2]. Основной вклад в процесс теплообмена вносит увеличение площади поверхности теплообмена. Но в то же время это увеличивает перепад давления теплоносителя, а соответственно и расход энергии на его транспортировку. И это является одним из важных вопросов при принятии решения использования пористых элементов.

Снизить гидравлическое сопротивление в пористой среде возможно несколькими способами: использование межканальной транспирации теплоносителя, использование пористой среды с локальным или равномерным изменением тензора проницаемости [3, 4]. В данной работе анизотропия пористой среды рассматривается в виде плавно изменяемой пористости.

В работе рассматривается канал, заполненный пористой средой (рис. 1) через которую протекает теплоноситель (слева направо). Внутреннее пространство канала представляет из себя пористую структуру, пористость которой изменяется по оси ординат согласно заданной кусочной непрерывной функции (рис. 2).

Рис. 1. Схема движения теплоносителя сквозь пористый канал

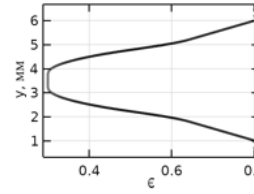


Рис. 2. Зависимость пористости ε от координаты пространства модели

Для получения теплогидравлических характеристик для построенной модели использован пакет инженерного анализа, основанный на численном решении дифференциальных уравнений.

Результаты численного моделирования представлены в виде одной из зависимостей $Nu(\mathrm{Re})$, представленной на рис. 3.

Результаты проведенного исследования позволяют сделать следующие выводы. Рассматриваемый пористый элемент имеет следующее преимущество: возможность направления потока в требуемые локальные области; высокие скорости в локальных областях, что способствует интенсификации теплообмена, например, в сравнении с раннее рассмотренным элементом в работе [5]. Таким образом, применение анизотропной пористости позволяет интенсифицировать процесс теплообмена в пористых теплообменных элементах.

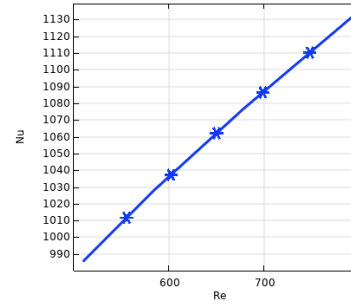


Рис. 3. Зависимость числа Нуссельта от числа Рейнольдса

Список литературы

1. **Коновалов Д.А.** Разработка и моделирование микроканальных систем охлаждения / Д.А. Коновалов, И.Г. Дроздов, Д.П. Шматов, С.В. Дахин, Н.Н. Кожухов. – Воронеж: ВГТУ, 2013. – 222 с.
2. **Коновалов Д.А.** Моделирование процессов тепломассопереноса в микроканальных теплообменниках систем управления космической техники / Д.А. Коновалов, Н.Н. Кожухов, И.Г. Дроздов // Вестник сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2016. - Т. 17. – № 1. – С. 137-146.
3. **Коновалов Д.А.** Разработка методов интенсификации теплообмена в микроканальных теплообменниках гибридных систем термостабилизации / Д.А. Коновалов, И.Н. Лазаренко, Н.Н. Кожухов, И.Г. Дроздов // Вестник воронежского государственного технического университета. – 2016. – Т. 12. – № 3. – С. 21-30.
4. **Carman P.C.** Fluid flow through granular beds / Carman P.C // Chemical Engineering Research and Design. – 1997. – V. 75. – Supplement. – pp. S32-S48. https://doi.org/10.1016/S0263-8762(97)80003-2.
5. **Кожухов Н.Н.** Моделирование гидродинамики течения теплоносителя в пористом элементе с одномерной градиентной пористостью / Н.Н. Кожухов, Е.А. Кожухова, Д.А. Коновалов, Д.А. Прутских, В.И. Перунова // Физико-технические проблемы энергетики, экологии и энергоресурсосбережения: труды 22-й научно-технической конференции. - Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2020. – С. 82-89.

N.N. Kozhukhov[1], E.A. Kozhukhova[1], D.A. Konovalov[1], D.A. Prutskikh[1],V.I. Perunova[1]

[1]Voronezh State Technical University, Voronezh, 394006, 20-letya Oktyabrya, 84

MODELING OF HEAT EXCHANGE IN A ELEMENT WITH ANISOTROPIC POROSITY

УДК 532.5, 536.33

Е.Ю. Коротеева, А.М. Шагиянова, П.А. Рязанов

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Москва, 119991, Ленинские горы, 1

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И ИЗМЕРЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕЧЕНИЯ ВБЛИЗИ ТВЕРДОЙ СТЕНКИ МЕТОДАМИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ТЕРМОГРАФИИ

Совершенствование методов визуализации течений жидкости и газа вблизи твердых стенок - актуальная задача в области тепломассообмена, связанная, в частности, с необходимостью прогнозирования воздействия пристеночных пульсаций на элементы конструкций энергетических установок. Перспективным направлением в решении данной задачи является применение инфракрасной (ИК) термографии к исследованиям пристеночных течений [1], в том числе с использованием новых подходов тепловизионной регистрации.

ИК термография – современный метод бесконтактной регистрации теплового излучения от объектов, позволяющий получать двумерные распределения температуры поверхности объектов и анализировать их изменения в реальном времени. Совершенствование тепловизионной техники – увеличение пространственного и временного разрешения - позволило существенно расширить круг задач, доступных для термографических исследований в гидрогазодинамике и теплофизике.

В данной работе представлены результаты, полученные на основе нового подхода к тепловизионной визуализации течений жидкости. В основе предложенного подхода – свойство большинства жидкостей (в частности, воды) эффективно поглощать инфракрасное излучение в узком пристеночном слое, который оказывается доступным для количественной визуализации в случае, если твердая стенка прозрачна для излучения того же диапазона. Тогда, если температурную неоднородность в течении можно рассматривать как пассивную примесь, регистрируемые тепловые пульсации отражают гидродинамику течения в приповерхностном слое [2,3].

В работе рассматриваются пристеночные течения воды, образующиеся при натекании затопленных импактных струй на преграду, смешении струй в тройниковых устройствах и пр. Начальные числа Рейнольдса течений – от 3000 до 35 000, скорости потоков – до 30 м/с. Тепловизионная регистрация проводится с помощью камеры FLIR SC7700, чувствительной к инфракрасному излучению в диапазоне 3.7-4.8 мкм. Съемка проводится через ИК-прозрачные материалы: фторид

кальция и селенид цинка. Частота съемки достигает 900 Гц (при ограничении пространственного разрешения камеры).

Обработка полученных тепловизионных изображений проводится по двум направлениям:

1) анализ временной динамики тепловых пульсаций в каждой точке двумерного поля течения: измерение их среднеквадратичных и спектральных характеристик. Это позволяет выявлять зоны развитого турбулентного течения, а также область ламинарно-турбулентного перехода в пристеночном течении.

2) кросс-корреляционная обработка последовательностей тепловизионных кадров, позволяющая оценить поля скорости в пристеночном слое на основе беззасевного трассирования.

Таким образом, предложенные подходы к применению методов ИК термографии дают возможность проводить одновременную количественную визуализацию гидродинамических параметров течений жидкости вблизи твердых стенок, в том числе получать поля скорости в приповерхностном слое, пространственные распределения среднеквадратичных пульсаций и их спектральных характеристик.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 19-79-00162.

Список литературы

1. **T. Astarita, G.M. Carlomagno.** Infrared Thermography for Thermo-Fluid-Dynamics, Springer Berlin Heidelberg, 2013.
2. **E. Koroteeva, A. Shagiyanova, I. Znamenskaya, and N. Sysoev.** Time-resolved thermographic analysis of the near-wall flow of a submerged impinging water jet // Experimental Thermal and Fluid Science, 110264, 2020.
3. **Коротеева Е. Ю., Знаменская И. А., Рязанов П. А.** Измерения полей скорости в пограничном слое жидкости на основе высокоскоростной термографии // Доклады Академии наук. 2020. Т. 491. С. 48–51.

E. Koroteeva, A. Shagiyanova, P. Ryazanov

Lomonosov Moscow State University,
Russia 119991 Moscow, Leninskie Gory, 1

VISUALIZATION AND MEASUREMENT OF FLOW PARAMETERS NEAR A SOLID WALL BASED ON HIGH-SPEED THERMOGRAPHY

УДК 621.9

Г.В. Михеева

Самарский государственный технический университет,
Самара, 443001, ул. Молодогвардейская, 244

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХТЕМПЕРАТУРНОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ НАНОПЛЁНКЕ

При облучении металлов ультракороткими высокоэнергетическими импульсами температуры электронов и кристаллической решётки могут существенно отличаться. Для изучения таких процессов используется двухтемпературная модель теплопереноса [1]:

$$c_1 \frac{\partial T_1(x,t)}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T_1(x,t)}{\partial x^2} + \alpha(T_2(x,t) - T_1(x,t)) + Q(x,t)\,; \quad (1)$$

$$c_2 \frac{\partial T_2(x,t)}{\partial t} = \alpha(T_1(x,t) - T_2(x,t))\,, \quad (2)$$

где T_1, T_2 – температуры электронов и ионов, *К*; α – коэффициент объемной теплоотдачи от электронов к решётке, *Вт/(м³·К)*; c_1, c_2 – объёмные теплоёмкости электронов и решётки, *Дж/(м³·К)*; $Q(x,t)$ – объемный источник теплоты, инициируемый лазерным облучением, *Вт/м³*; x – координата, *м*; λ – коэффициент теплопроводности материала, *Вт/(м·К)*.

Зависящий от координаты и от времени внутренний источник теплоты, возникающий вследствие лазерного излучения, определяется по формуле гауссова распределения [1, 2]

$$Q(x,t) = Q_0 \exp\left(-\frac{x}{\mu} - \frac{(t-t_0)^2}{\beta t_0^2} \right), \quad (3)$$

где $Q_0 = J/\mu$; J – плотность теплового потока лазерного излучения, *Вт/м²*; μ – глубина оптического проникновения, *м*; t_0 – момент времени лазерного импульса, *с*; β – безразмерный коэффициент, регулирующий продолжительность импульса.

Краевые условия к уравнениям (1), (2) будут

$$T_1(x,0) = T_2(x,0) = T_0; \quad (4) \qquad \frac{\partial T_1(0,t)}{\partial x} = \frac{\partial T_1(\delta,t)}{\partial x} = 0\,, \quad (5)$$

где $T_0 = 300\ K$ – начальная температура; $\delta = 100\ нм$ – толщина нанопленки. Для решения задачи (1) – (5) применялся метод конечных разностей. Для численного решения вводилась равномерная конечно-разностная сетка с 6-точечным шаблоном.

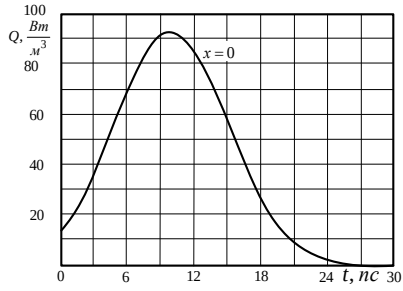


Рис. 1. Изменение мощности лазерного импульса во времени на поверхности наноплёнки

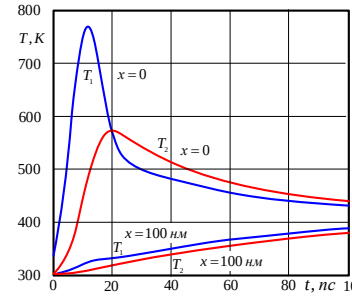


Рис. 2. Изменение температур электронов T_1 и кристаллической решётки T_2. T_1 — ——, T_2 — ——

На рис. 1 показан профиль ультракороткого (30 пс) лазерного импульса, задаваемого на поверхности свинцовой наноплёнки. На рис. 2 приведены результаты численного исследования её температурного состояния при исходных данных: $J = 15 \cdot 10^{11}$ *Вт/м*^{2}; $\mu = 15.3$ *нм*; $t_0 = 10$ *пс*; $\beta = 0.5$. Из анализа расчётных данных, приведенных на рис. 2 следует, что сначала тепловой импульс передается электронам, затем кристаллической решетке. Температура электронов T_1 может значительно превышать температуру плавления свинца ($T_{пл} = 600\ K$), при этом наноплёнка будет находиться в нерасплавленном состоянии, т.к. температура решетки T_2 не достигла температуры плавления. В данном случае равновесное состояние достигается при $t = 420$ *пс*, а равновесная температура равна 410 *K*.

Список литературы

1. **Sobolev S.L.** Nonlocal Two-Temperature Model: Application To Heat Transport in Metals Irradiated By Ultrashort Laser Pulses // International Journal of Heat and Mass Transfer, 94 (2016), P. 138 – 144.
2. **Соболев С.Л.** Процессы переноса и бегущие волны в локально-неравновесных системах // УФН. 1991. Т. 161, № 3. С. 5 – 29.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-70021.

G.V. Mikheeva

Samara State Technical University,
Russia 443001 Samara, st. Molodogvardeyskaya, 244

NUMERICAL STUDY OF TWO TEMPERATURE MODEL OF HEAT TRANSFER IN METAL NANOFILM

УДК: 66.045

А.Р. Лепешкин[1,2], *И.С. Вербанов*[2], *М.Ю. Ильеня*[1], *О.И. Ильинская*[1]

[1] Московский авиационный институт – Научно-исследовательский университет, 125993, Москва, Волоколамское ш., 4

[2]Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Москва, 111116, ул. авиамоторная, 2

МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕПЛООБМЕННИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Одним из путей повышения эффективности и КПД стационарных газотурбинных установок (ГТУ) и авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) является повышение температуры воздуха на входе в камеру сгорания за счет утилизации тепла газов на выходе из турбины. С этой целью за турбиной располагается теплообменник.

Одной из основных задач создания надежного пластинчатого теплообменника является исследование термоциклической долговечности его элементов и узлов, что определяет актуальность данной работы.

Проведение испытаний теплообменников и их элементов возможно на различных видах испытательного оборудования, имитирующего условия их работы в газовом потоке газотурбинного двигателя (ГТД). Это могут быть газодинамические установки, установки с высокочастотным (ВЧ) индукционным нагревом [1-4], установки с электронагревом и установки с радиационным нагревом. Газодинамический стенд позволяет производить испытание с максимальным приближением к реальным условиям, однако, стоимость таких испытаний очень высока и на этапе прочностной доводки применение их нецелесообразно. Реально использовать газовый стенд для контрольной проверки также не представляется возможным.

ВЧ нагрев при достаточно высокой частоте удовлетворительно имитирует поверхностный нагрев в газовом потоке. Стоимость испытаний с ВЧ нагревом на несколько порядков ниже стоимости испытаний на газовом стенде. Малая стоимость испытаний с ВЧ нагревом позволяет производить всесторонние исследования конструкций с целью установления влияния на их термоциклическую долговечность различных конструкционно-технологических факторов, таких как различная толщина материала пластин, различные материалы, различные способы сборки и сварки и т.п.

В процессе работы проведены следующие исследования: разработана и усовершенствована методика термоциклических испытаний секции теплообменника с использованием ВЧ индукционного нагрева, проведен анализ условий работы теплообменника и выявлены наибо-

лее термонапряженные участки, выбраны оптимальные размеры конструкции индуктора, определены способы и границы эффективного управления температурным градиентом в перемычках теплообменника, проведенные исследования показали возможность использования ВЧ нагрева при испытании секции теплообменника [5] на термоциклическую долговечность.

В процессе испытаний охлаждение секции теплообменника при термоциклировании происходило с помощью охлаждающего воздуха, подаваемого после режима выдержки на максимальной температуре и выключении нагрева. На основе проведенных испытаний определены результаты по термоциклической долговечности элементов секций теплообменников с лазерной сваркой.

Список литературы

1. **Лепешкин А.Р., Кувалдин А.Б.** Скоростные режимы индукционного нагрева и термонапряжения в изделиях. Монография. М.: Инфра-М. серия: Научная мысль. – 2019. – 282 с.
2. **Лепешкин А.Р.** Теплофизические измерения при термоциклировании лопаток газотурбинных двигателей с керамическими покрытиями // Теплофизика высоких температур. 2010. Т. 48. № 5. - С. 734-740.
3. **Lepeshkin A.R., Feng Shi.** Ceramic Coatings - Applications in Engineering. Intech. – 2012. – 320 p.
4. **Лепешкин А.Р.** Индуктор для высокочастотного нагрева изделий сложного профиля. Патент № 2297114. 2007. Бюл. № 10.
5. **Лепешкин А.Р. и др.** Пластинчатый теплообменник. Патент № 2350874. 2009. - Бюл. № 9.

A.R. Lepeshkin [1,2], I.S. Verbanov [2], M.Y. Ilyenya [1], O.I. Ilinskaya [1]

[1] Moscow Aviation Institute - National Research University,
125993, Moscow, volokolamskoe h., 4

[2] Central Institute of Aviation Motors, Russia 111116 Moscow, Aviamotornaya, 2

TESTING METHOD FOR HEAT EXCHANGER ELEMENTS USING INDUCTION HEATING

УДК 544.45

О.С. Гайдукова, П.А. Стрижак

Томский политехнический университет,
634050, Томск, пр. Ленина, 30 (•)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПРОЦЕССА ЗАЖИГАНИЯ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ ПРИ КОНДУКТИВНОМ ТЕПЛООБМЕНЕ

Исследование процессов зажигания и горения газовых гидратов представляет значительный интерес для решения задач расширения топливной базы на территориях с экстремальными климатическими условиями, обеспечения ресурсной безопасности и удовлетворения потребностей в доступной чистой энергии [1].

Целью настоящей работы является исследование процесса зажигания газового гидрата с учетом группы взаимосвязанных процессов теплопереноса, с помощью сформулированной математической модели, описывающей характеристики и условия горения при кондуктивном теплообмене.

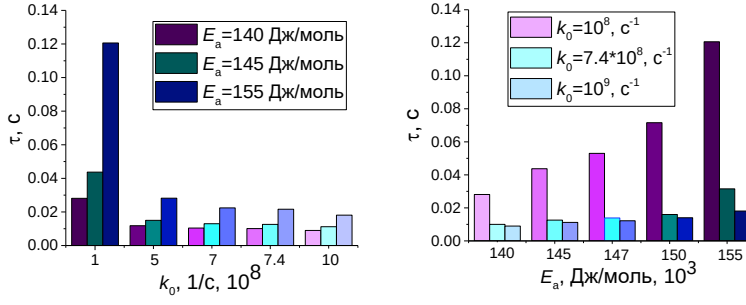
На основе экспериментально установленных закономерностях протекания процессов теплопереноса, фазовых превращений и химического реагирования была формулирована математическая постановка задачи зажигания гидрата. При формулировании постановки задачи считалось, что на поверхность разогретого до высоких температур металлического цилиндра помещается газовый гидрат в виде порошка, температура которого близка к криогенной. При моделировании в качестве источника нагрева принят металлический цилиндр малых размеров.

В результате исследования замечено, что с ростом энергии активации скорость горения значительно уменьшается, что приводит к снижению потока (массового прихода) метана и к снижению скорости горения. В результате, скорость прогрева частицы газового гидрата уменьшается, а время задержки возрастает, что хорошо видно из рис. 1*а*. Рост энергии активации физически характеризует больший энергетический барьер, который необходимо преодолеть для интенсификации химического реагирования. Так как в исследуемой системе протекают нелинейные по зависимостям скоростей от температуры процессы испарения и реагирования, то повышение энергии активации приводит к существенно нелинейному увеличению времени задержки зажигания.

При высоком тепловом потоке в процессе горения, а также при большой толщине слоя порошка предэкспоненциальный множитель

(•) О.С. Гайдукова, osy1@tpu.ru

становится сильно зависимым от теплового потока. Наличие же плато на рис. 1*б* говорит о том, что при уменьшении толщины слоя и при увеличении теплового потока, существует предельно высокая скорость диссоциации (критическое значение). Выше этого значения, скорость распада и задержка времени зажигания становятся постоянными, так как внутренняя кинетика обладает преобладающим сопротивлением и регулирует кинетику диссоциации.



а) *б)*

Рис. 1. Зависимость времени задержки зажигания газового гидрата (τ): *а* – от предэкспоненциального множителя реакции окисления паров горючего (k_0); *б* – от энергии активации реакции окисления паров горючего (E_a) при температуре металлического цилиндра 800 ºС.

Исследование поддержано грантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение №075-15-2020-806 (договор №13.1902.21.0014).

Список литературы

1. **Chen B.** Visualization study on the promotion of natural gas hydrate production by water flow erosion // Fuel. 2019. No. 235. P. 63–71.

O.S. Gaidukova, P.A. Strizhak

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

INVESTIGATION OF THE GAS HYDRATES IGNITION REGULARITIES DURING CONDUCTIVE HEAT EXCHANGE

УДК 62-664.2

Г.С. Няшина[1], *М.А. Курганкина*[1], *А.С. Щвец*[1], *М.Р. Ахметшин*[1,2]

[1]Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, 634050, пр. Ленина, 30(•)

[2] ОА «ТомскНИПИнефть», Томск, 634027, пр. Мира, 72

ЭФФЕКТИВНЫЕ УСЛОВИЯ УТИЛИЗАЦИИ БИОМАССЫ

Необходимость снижения антропогенных выбросов, образующихся в результате сжигания ископаемого топлива, и удовлетворении растущего глобального спроса на энергию являются приоритетными проблемами, стоящими перед человечеством. Поиск альтернативных ресурсов, способных снизить экологическую нагрузку и восполнить растущий спрос на электроэнергию, является важной задачей. Биомасса и невостребованные местные углеродные ресурсы (например, торф и т.д.) могут быть рассмотрены в рамках данного направления. Сжигание, пиролиз являются наиболее распространенными термохимическими способами конверсии индустриальных отходов и биомассы. Ввиду последнего требуется определить эффективный подход к конверсии биомассы с учетом энергетических, экологических и экономических показателей. Энергетически, экономически и экологически оптимальное использование является первым шагом при создании необходимых условий для использования имеющегося потенциала ресурса. Решение вопроса эффективного использования биомассы и низкосортных топлив на практике является сложным, так как необходимо учитывать большую группу взаимосвязанных факторов. Многокритериальный анализ принятия решений (MCDA) является одним из наиболее перспективных подходов для определения предпочтительной технологии использования/утилизации ресурсов.

Вычисление относительных показателей эффективности сжигания и пиролиза отходов выполнено в соответствии с методом взвешенной суммы (WSM – Weight sum method). Данный метод объединяет все разноразмерные критерии в одну взвешенную сумму с использованием формулы:

$$A_n = \sum \gamma_j \cdot X_{ij}.$$

где γ_j – весовой коэффициент для каждого критерия; X_{ij} – нормализованное значение критерия.

С целью определения предпочтительного типа топлива (опилки, солома, листья, их смесь, торф) и эффективного способа их использования (сжигание, пиролиз) рассматривались следующие критерии сравнения: теплота сгорания сырья, влажность, количество летучих, содер-

(•) Г.С. Няшина, gsn1@tpu.ru

жание углерода, зольность, концентрации CO_2, CO, NO_x, стоимость сырья, для пиролиза дополнительно учитывалась теплота сгорания генераторного газа, концентрации H_2 и CH_4.

Значения рассчитанных относительных показателей эффективности сжигания и пиролиза представлены на рис 1.

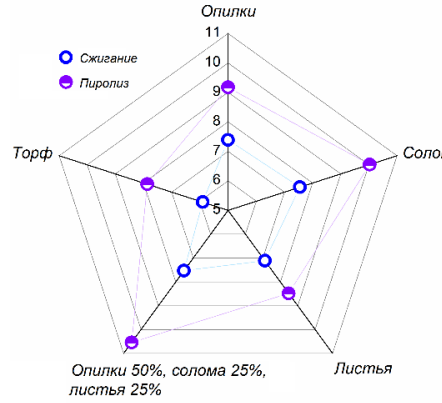


Рис. 1. Рассчитанные значения относительные показатели эффективности для разных топлив и технологий использования.

Анализ полученных данных (рис. 1) показал, что значения показателей эффективности для всех типов биомассы соответствуют близкому диапазону, разница между ними составляет не более 19%. Однако можно отметить, что как для сжигания, так и для пиролиза наивысшими показателями эффективности характеризуется смесевая композиция. Последнее объясняется возникающими синергетическими эффектами, которые в случае сжигания способствуют снижению концентраций антропогенных выбросов, при пиролизе интенсифицируют выход горючих газов, повышая при этом теплотворную способность генераторного газа. Установлено, что наименьшим показателем эффективности среди рассмотренных топлив характеризуется торф. При сравнении двух технологий использования пиролиз оказался более эффективен.

Полученные результаты обобщения можно использовать при выборе как компонентного состава топливных смесей с биомассой, так и технологий их вовлечения в производственные циклы при выработке тепловой и электрической энергии.

Исследования, связанные со сжиганием топлив, выполнены при поддержке гранта РФФИ (проект № 18-43-700001). Изучение процессов пиролиза производилось при поддержке гранта РФФИ № 19-53-80019.

G.S. Nyashina[1], *M.A. Kurgankina*[1], *A.S. Shvets*[1], *M.R. Akhmetschin*[1,2]

[1] National Research Tomsk Polytechnic University,
Russia 634050 Tomsk, Lenin Avenue, 30
[2] OA «TomskNIPIneft», Russia 634027 Tomsk, Mira Avenue, 72

EFFECTIVE CONDITIONS FOR BIOMASS DISPOSAL

СЕКЦИЯ 5

Химические превращения и тепломассообмен

УДК 536.423:536.4.033:536.46

В.В. Кузнецов

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

ТЕПЛОМАССООБМЕН ПРИ ФАЗОВЫХ И ХИМИЧЕСКИХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ В СЛОЖНЫХ КАНАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Современное энергетическое оборудование характеризуется высокой производительностью, энергоэффективностью и экологическими требованиями. Для достижения необходимых показателей широко применяются сложные канальные системы, позволяющие значительно повысить энергоэффективность и производительность вследствие применения различных методов интенсификации процессов тепломассообмена. Отсутствие надежных методов расчета таких установок, обусловленное слабой изученностью взаимосвязи гидрогазодинамических и тепломассообменных процессов в сложных канальных системах при наличии фазовых переходов и химических реакций, в значительной степени сдерживает разработку оборудования для водородной, космической и атомной энергетики [1]. В данной работе рассмотрены процессы тепломассообмена в системах сжижения природного газа, криогенных разделительных установках, системах охлаждения теплонапряженного оборудования, микроструктурных реакторах-теплообменниках водородной и атомно-водородной энергетики.

Рассмотрены методы физического и математического моделирования процессов тепломассообмена в тепломассообменных аппаратах для сжижения природного газа и криогенного разделения воздуха. Установлены физические механизмы парожидкостного течения бинарных смесей, разработан метод расчета межфазного тепломассообмена в каналах структурных насадок с удельной поверхностью до 750 $м^2/м^3$. Основной особенностью данного метода расчета является учет многомаштабности течения в сложных канальных системах, возникающей вследствие взаимосвязи гидродинамических и массообменных процессов. Рассмотрены методы моделирования процессов тепломассообмена при кипении и конденсации в пластинчато-ребристых испарителях и конденсаторах систем сжижения природного газа с вихревой интенсификацией тепломассообмена в условиях вынужденной конвекции. Установлено, что направленная деформация поверхности пленки жидкости капиллярными силами и интенсификация теплообмена в окрестности контактной линии при образовании сухих пятен приводят к значительному увеличению коэффициентов теплоотдачи в компактных теплообменниках и микроканальных системах охлаждения.

Для обоснования применения микроканальных систем отвода тепла от теплонапряженных зон энергетического оборудования и микропроцессоров экспериментально установлены закономерности фазовых переходов в микроканалах, разработан метод расчета теплообмена в микроканалах, учитывающий совместно вклад подавления пузырькового кипения, двухфазной конвекции и испарения пленки жидкости при насыщенном и недогретом кипении, в том числе бинарных смесей. Установлены физические механизмы, экспериментально обоснованы методы повышения интенсификации теплообмена и повышения критической тепловой нагрузки при микроструктурировании теплообменной поверхности для кипения диэлектрической жидкости и хладонов в микроканальных и микроструйных системах охлаждения.

Исследованы многостадийные физико-химические превращения при конверсии углеводородных ресурсов в неизотермических условиях в каталитических микроструктурных системах получения водорода, предложена методы интегрирования потоков тепла и продуктов реакций в энергоустановках водородной энергетики для повышения их эффективности. Разработаны методы получения водорода при каталитической конверсии широкого спектра природных и возобновляемых углеводородов и их производных в неизотермических условиях в микроканальных реакторах-теплообменниках. Рассмотрены перспективы крупномасштабного производства водорода на основе паровой конверсии природного газа в установках атомно-водородной энергетики с использование тепла высокотемпературного гелиевого реактора. Изучена конверсия синтез-газа в жидкие и твердые углеводороды в микроканальных и микроструктурных многофазных реакторах Фишера-Тропша, установлены условия высокой степени конверсии исходного продукта.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН и гранта Российского Научного Фонда (проект № 21-19-00626).

Список литературы

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

V.V. Kuznetsov

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

HEAT AND MASS TRANSFER AT PHASE CHANGE AND CHEMICAL TRANSFORMATIONS IN COMPLEX DUCT SYSTEMS OF POWER EQUIPMENT

УДК 621.9

А.Ю. Снегирёв, Е.А. Кузнецов, Е.С. Маркус, В.С. Заборовский, В.А. Мулюха

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

ФОРМИРОВАНИЕ, РОСТ И ПОТЕРЯ УСТОЙЧИВОСТИ ДИФФУЗИОННОГО ПЛАМЕНИ В НЕВЕСОМОСТИ. КОСМИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ «ФЛАМЕНКО»

В космическом эксперименте «Фламенко» изучается диффузионное пламя над плоской пористой горелкой, предназначенной для имитации свойств конденсированных горючих материалов. Несмотря на значительную интенсивность исследований горения в невесомости, пламёна данного типа (очень малая скорость истечения горючего, плоская поверхность источника, неподвижная окружающая среда с разной концентрацией кислорода) до настоящего времени не были изучены. Практическая значимость изучения устойчивости данного типа пламени заключается в том, что она определяет возможность горения твёрдых горючих материалов и их пожароопасность. Сеансы КЭ «Фламенко» выполнялись в 2019-2020 гг. на американском сегменте МКС в рамках серии экспериментов ACME (BRE) [1, 2].

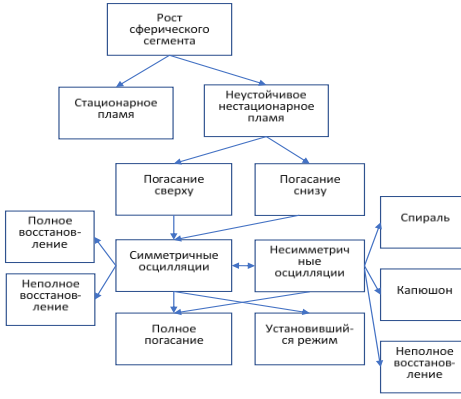


Рис. 1. Последовательность состояний диффузионного пламени, наблюдавшихся в КЭ «Фламенко».

В данной работе представлен обзор режимов формирования, роста и потери устойчивости диффузионного пламени метана и этилена в атмосфере с мольной долей кислорода от 0.21 до 0.4. Многообразие режимов, характеризующих динамику пламени, показано на Рис. 1.

После воспламенения пламя в невесомости всегда принимает форму сферического сегмента (Рис. 2, а), длительность устойчивого существования которого увеличивается с ростом концентрации кислорода в испытательной

камере. В остальных случаях пламя испытывает локальное погасание на вершине (Рис. 2, б), переходит в нестационарный режим и может полностью погаснуть (именно этот сценарий реализуется в нормальной атмосфере). В ходе осцилляций пламя либо сохраняет симметрию относительно оси горелки, либо становится несимметричным. В последнем случае наблюдаются, в частности, сегменты пламени в форме спирали (Рис. 2, в) или капюшона.

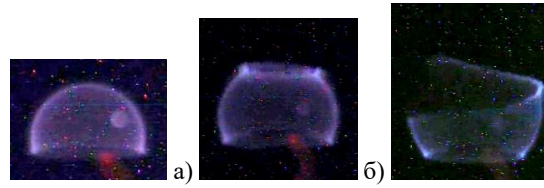

а) б) в)

Рис. 2. Состояния диффузионного пламени, наблюдавшиеся в сеансах КЭ «Фламенко»: а) – устойчивое пламя в форме сферического сегмента; б) – симметричные осцилляции; в) – вращение спирального сегмента.

Для численного моделирования экспериментальных сценариев КЭ «Фламенко» разработана трёхмерная математическая модель, учитывающая многостадийные и многокомпонентные химические механизмы окисления горючих, образование и окисление сажи, тепловое излучение продуктов сгорания. Результаты численного моделирования показывают согласие расчётной и экспериментальной формы пламени, как на стадии устойчивого роста, так и в режиме неустойчивых колебаний с образованием тройного пламени. Анализ показывает, что причиной потери устойчивости и погасания пламени является экстремально высокий уровень радиационных теплопотерь.

Список литературы

1. **Snegirev A., Kuznetsov E., Markus E., Dehghani P., Sunderland P.** Transient dynamics of radiative extinction in low-momentum microgravity diffusion flames, Proceedings of the Combustion Institute. 2020. Vol. 38.
2. **Кузнецов Е.А., Снегирёв А.Ю., Маркус Е.С.** Радиационное погасание ламинарного диффузионного пламени над плоской пористой горелкой в условиях невесомости. Численное моделирование // ФГВ. 2020. Т. 56. №4. С. 26-45.

При поддержке: *РФФИ (проект № 20-08-00478), АО «ЦНИИмаш» госкорпорации «Роскосмос», АНО «ПожароВзрывоБезопасность» (Санкт-Петербург).*

A.Yu. Snegirev, E.A. Kuznetsov, E.S. Markus, V.S. Zaborovskiy, V.A. Mulukha

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

FORMATION, GROWTH, AND LOSS OF STABILITY OF THE IFFUSION FLAME IN MICROGRAVITY. ORBITAL EXPERIMENT «FLAMENCO»

УДК 536; 661.96

Д.В. Блинов[1,2], *В.И. Борзенко*[1], *Д.О. Дуников*[1,2], *А.Н. Казаков*[1], *И.А. Романов*[1]

[1] Объединенный институт высоких температур РАН,
111116, Москва, Красноказарменная, 17А
[1] Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Россия, г. Москва, Красноказарменная улица, дом 14

ПРОЦЕССЫ ТЕПЛОМАССООБМЕНА В УСТРОЙСТВАХ ТВЕРДОФАЗНОГО ОБРАТИМОГО ХРАНЕНИЯ И ОЧИСТКИ ВОДОРОДА

Технология твердофазного хранения водорода основана на свойстве некоторых металлов и их сплавов обратимо поглощать достаточно большие количества водорода [1]. Активные исследования и разработки в области обратимых металлогидридных материалов привели к созданию эффективных поглощающих сплавов и систем аккумулирования и очистки водорода с их использованием.

Однако развитие и совершенствование металлогидридных устройств сдерживается рядом проблем, связанных с процессами тепломассообмена внутри засыпки поглощающего сплава: в активированном состоянии водородопоглощающие материалы представляют собой мелкодисперсные порошки с размером частиц порядка 1–10 мкм, обладающие сравнительно низкой эффективной теплопроводностью (порядка 1 Вт/м·К), зависящей от давления заполняющего газа и концентрации поглощенного водорода в частицах сплава. Недостаточно эффективный подвод и отвод тепла к засыпке водородопоглощающего материала в сочетании с большим тепловым эффектом реакции поглощения/выделения водорода (25–70 кДж/моль H_2) приводит к существенному снижению скорости поглощения и выделения водорода устройством (т.н. «кризис тепломассообмена»), кроме того, наличие неабсорбируемых газов в водороде не только снижает скорость зарядки устройства, но может также отравить поверхность водородпоглощающего сплава. [2-4]

Оптимизация металлогидридных устройств сосредоточена на вопросах интенсификации теплообмена в водородпоглащающих материалах. Здесь можно выделить два основных направления:

- развитие поверхности теплообмена, заключающееся во введении в засыпку водородопоглощающих материалов дополнительных теплообменных поверхностей для интенсификации процесса теплоотдачи (создание оребрения, введение дополнительных каналов для течения теплоносителя внутри засыпки, утончение слоя водородопоглощающего материала и т.п.)

- изменение теплофизических свойств засыпок водородопоглощающих материалов с целью повышения их эффективной теплопроводности (смешивание и/или спекание с порошками высокотеплопроводных материалов – алюминия, меди с повышением эффективной теплопроводности засыпки до 3–6 Вт/м^{2}К).

В лаборатории водородных энергетических технологий ОИВТ РАН разработаны и созданы металлогидридные устройства различных типов (картриджные, труба в трубе, гофрированные, горизонтального и вертикального расположения, реакторы проточного типа) и объемов аккумулируемого водорода (от сотен норм.л. до десятков норм.м^3 водорода). Исследованы особенности тепловых процессов при работе таких устройств на чистом водороде, а также при наличии газовых примесей. Исследованы процессы при системной интеграции разработанных металлогидридных устройств с топливными элементами и электролизерами в составе энергоустановок киловаттного уровня мощности.

Список литературы

1. **Тарасов Б.П., Лотоцкий М.В., Яртысь В.А.** Проблема хранения водорода и перспективы использования гидридов для аккумулирования водорода// Российский химический журнал (Журнал Российского химического об-ва. им. Д.И.Менделеева), 2006 г, т.L, №6.
2. **Mordkovich V. Z.**, et.al. Comparative efficiency of using hydrides in industrial processes of hydrogen recovery and compression // International Journal of Hydrogen Energy. 1993. Т. 18, № 10.С. 839-842.
3. **Sun D.W., Deng S.J.** A Theoretical Model Predicting the Effective Thermal Conductivity in Powdered Metal Hydride Beds // International Journal of Hydrogen Energy. 1990. V. 15. № 5. P. 331.
4. **Sandrock G.D., Goodell P.D.** Cyclic life of metal hydrides with impure hydrogen: Overview and engineering considerations. Journal of the Less Common Metals, Volume 104, Issue 1, 3 December 1984, Pages 159-173.

D.V. Blinov [1,2], V.I. Borzenko[1], D.O. Dunikov[1,2], A.N. Kazakov[1], I.A. Romanov[1]

[1] Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences,
Russia, 111116 Moscow, Krasnokazarmennaya, 17A
[2] National Research University "MPEI",
Russia, 111250 Moscow, Krasnokazarmennaya, 14

HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES IN SOLID PHASE REVERSIBLE HYDROGEN STORAGE AND PURIFICATION DEVICES

УДК 007.51

А.И. Счастливцев, В.И. Борзенко

Объединенный институт высоких температур РАН,
111116, Москва, Красноказарменная, 17А

ОСОБЕННОСТИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ВОДОРОДОСЖИГАЮЩИХ УСТАНОВКАХ И СИСТЕМАХ НА ИХ ОСНОВЕ

Водород как топливо для энергоустановок имеет ряд важных особенностей: высокую теплоту сгорания, широкие концентрационные пределы воспламенения и устойчивого горения, высокие скорости распространения пламени (в 7 раз выше, чем для метана), низкие энергии активации при сгорании в кислороде и воздухе. Удельные тепловые мощности, передаваемые через сечение сопла камеры сгорания, для водорода в 1.7 раза выше, чем для метана. Эти свойства водорода позволяют обеспечить высокую стабильность работы камер сгорания в широком интервале составов топливно-окислительной композиции, относительно небольшие размеры водородосжигающих установок и их умеренную стоимость. Продукт сгорания водорода - водяной пар, при температуре окружающей среды почти полностью конденсируется, т.е. эксергия водорода как топлива может быть использована с максимальной эффективностью. Для энергетики имеет большое значение то обстоятельство, что при сгорании стехиометрической смеси водорода в кислороде образуется чистый перегретый водяной пар - рабочее тело современных паротурбинных установок. При этом передача тепла от топлива к рабочему телу может осуществляться наиболее эффективно - путем смешения продуктов сгорания (перегретого водяного пара с высокой температурой) с рабочим телом (водой или водяным паром), т.е. с минимальными потерями эксергии топлива.

При разработке водородосжигающих установок следует отметить следующие особенности протекающих в них тепловых процессов:

- Обеспечение надежного охлаждения наиболее теплонапряженных узлов водородосжигающих установок является важной конструкторской задачей. В частности, в работе [1] авторы утверждают, что обычно тепловые потоки в камере сгорания таких установок составляют до 20 МВт/м^2.
- При подаче продуктов сгорания в проточную часть турбины важным требованием к их параметрам является неравномерность температур, которая должна составлять не более 15…30 градусов по радиусу.

- Наличие недогоревшего водорода в продуктах сгорания особенно опасно при последующем использовании этого пара в замкнутых циклах паротурбинных установок. Даже небольшое его содержание (менее 1 % (об.)) может приводить к образованию взрывоопасной смеси в застойных зонах элементов энергетического оборудования, в частности в конденсаторах [2].

Являясь универсальными и компактными устройствами, водородосжигающие установки позволяют реализовать разнообразные термодинамические циклы преобразования энергии с использованием современной и перспективной паротурбинной и газотурбинной техники [3]. При их использовании практически снимаются ограничения на температуру перегретого пара, определяемые материалами котельных агрегатов и паропроводов, и оказывается возможной модернизация существующих энергоустановок, позволяющая полностью реализовать резервы мощности имеющегося оборудования, повысить КПД энергоустановок и снизить удельные расходы теплоты на выработанный киловатт-час электроэнергии.

Список литературы

1. **Shternfeld H. J., Wolfmuller K.** The hydrogen/oxygen spinning reserve system – an approach to the economic generation of electricity from hydrogen // VGB Kraftwerkstechnik. – 1986. № 66. – С. 675-683.
2. **Мильман О. О., Федоров В. А., Карпушин А. Г., Лошкарева Е. А.** Взрывоопасность водорода при низких давлениях в конденсаторах энергоустановок // Альтернативная энергетика и экология –2013. – Т. 6-1, № 127. – С. 17-22.
3. **Малышенко С. П., Пригожин В. И., Рачук В. С.** Водородо-кислородные парогенераторы // Современное машиностроение. – 2009. – Т. 2-3. – С. 54.

A.I. Schastlivtsev, V.I. Borzenko

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

FEATURES OF THERMODYNAMIC AND THERMAL PROCESSES IN HYDROGEN COMBUSTION UNITS AND SYSTEMS ON THEIR BASIS

УДК 621.434:536

А.А. Зеленцов

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Москва, 105005, 2-ая Бауманская, 5 (•)

ОСОБЕННОСТИ 0-1D И 3D МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА СОВРЕМЕННОГО АВИАЦИОННОГО ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Современные возможности математического моделирования позволяют с высокой точностью определять параметры рабочего процесса двигателей внутреннего сгорания еще на этапе проектирования.

Нульмерный подход, часто применяющийся для оценки эффективных показателей АПД и подразумевающий изменение рабочих параметров двигателя в одной или нескольких зонах камеры сгорания, не позволяет корректно учесть все особенности геометрии цилиндра. Также нет возможности оптимизировать положение свечей зажигания, оценить эффективность наполнения и подобрать оптимальную форму впускных и выпускных каналов в головке двигателя. Эти особенности возможно учесть при использовании трехмерного подхода. Кроме того, локальные значения параметров в различных точках расчетного объема критически важны для моделирования выбросов вредных веществ и теплообмена в цилиндре.

В то же время при текущем уровне развития вычислительной техники нецелесообразно использовать достаточно затратный по времени и ресурсам трехмерный подход для решения задач оптимизации рабочего процесса.

Цель настоящей работы – показать возможность совместного использования 0-1 мерного и трехмерного подходов при проектировании перспективных авиационных поршневых двигателей (АПД) различных типов.

На первом этапе в 0-1 мерной постановке выполняется оптимизация основных параметров двигателя. Далее на основании полученных данных готовится трехмерная модель его внутреннего объема, включая впускные и выпускные каналы. Затем вся расчетная область разбивается на конечное число контрольных объемов (КО), для каждого из которых решается система уравнений энергии, движения, неразрывности и диффузии [1]. Перемещение поршня и клапанов при этом учитывается за счет деформации сетки по направлению их движения. В отдельных случаях созданию полноценной модели цилиндра с впуском и выпуском может предшествовать предварительный анализ процессов сжатия

(•) А.А. Зеленцов, zelentsov.aa@gmail.com

от момента закрытия впуска, сгорания и расширения до момента открытия выпуска.

Для разработки конструкции головки двигателя необходимо определить форму впускных и выпускных каналов еще на ранних этапах проектирования, вследствие чего задача оптимизации формы каналов выносится на отдельное рассмотрение и решается путем моделирования процесса продувки каналов различной формы.

Для внешнего смесеобразования возможны также расчеты на моделях, включающих только впускные каналы, с целью определения наилучшего положения форсунки во впускной системе. В этом случае решаются задачи расчета процесса впрыскивания, образования топливной пленки, смесеобразования в процессе наполнения цилиндра исследуемого двигателя. Также необходимо контролировать равномерность состава смеси по впускным каналам.

После разработки конструкции камеры сгорания, впускных и выпускных каналов и создания полноценной трехмерной модели с учетом впуска и выпуска возможно исследование влияния положения, размерности и типа свечей зажигания на рабочий процесс двигателя с принудительным воспламенением и внешним смесеобразованием. Для случая внутреннего смесеобразования также проводится согласование формы камеры сгорания и параметров непосредственного впрыскивания топлива (количество и наклон факелов топлива, определяемый геометрией форсунки, место ее установки и ориентация в камере сгорания, закон подачи топлива).

Разработанный метод применяется при создании различных АПД, как с воспламенением от электрической искры, так и с самовоспламенением от сжатия. Возможно его использование для анализа рабочего процесса при разработке новых и совершенствовании существующих роторно-поршневых двигателей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №18-08-00275а).

Список литературы

1. FIRE. Users Manual Version 2019.2 / AVL List GmbH. Graz (Austria), 2020. (License Agreement for Use of the Simulation Software AVL FIRE between Moscow State Technical Univ. n.a. N.E. Bauman and AVL List GmbH, 2014).

A.A. Zelentsov

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

FEATURES OF 0-1D AND 3D SIMULATION OF WORKING PROCESS OF STATE-OF-THE-ART AIRCRAFT PISTON ENGINE

УДК 536.468

М.В. Пурин[1], *С.В. Сыродой*[1], *В.В. Саломатов*[2]

[1]Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск, 634050, проспект Ленина, 30.
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
Новосибирск, 630090, проспект Академика Лаврентьева, 1

ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УТИЛИЗАЦИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН В СОСТАВЕ ВОДОУГОЛЬНЫХ ТОПЛИВ

В условиях растущего в мире спроса на электроэнергию, а также за улучшение экологической обстановки, актуальными становятся исследования процессов горения водоугольных топлив (ВУТ). Перспективы использования последних достоверно установлены [1]. Обоснованы преимущества ВУТ перед традиционными энергетическими топливами: углём [2], газом [3] и мазутом.

Вместе с тем ВУТ обладает и рядом недостатков, основным из которых является значительная задержка зажигания даже при относительно высоких температурах топочной среды. Как установлено в [4], задержка зажигания может достигать нескольких десятков секунд. Последнее существенно затрудняет проектирование котельных агрегатов, сжигающих водоугольное топливо.

Одним из способов ускорения зажигания капель ВУТ является внедрение в структуру топлива различных добавок, повышающих реакционную способность. Одной из перспективных таких добавок являются жидкие продукты термического разложения резины автомобильных шин. Это уже о новый вид многокомпонентного топлива, представляющего собой смесь угля, воды и синтетической нефти. Стоит сказать, что до настоящего времени в научной периодике нет работ с описанием результатов теоретических или экспериментальных исследований процессов горения таких существенно неоднородных топлив. Поэтому, целью нашей работы является установление по результатам экспериментов основных закономерностей процессов зажигания и горения частицы могокомпонентного топлива вода-уголь/синтез-нефть, а также разработка математической модели этих процессов.

С целью установления экспериментальных характеристик воспламенения водоугольного топлива с добавкой жидких продуктов пиролиза автомобильных шин были проведены экспериментальные исследования на стенде, который по своим средствам регистрации и методике обработки результатов эксперимента соответствует установке, приведенной в [5].

По результатам экспериментальных и теоретических исследований процессов зажигания установлены зависимости времен задержки зажигания частиц топлива вода-уголь/синтез-нефть от температуры внешней среды (рисунок 1).

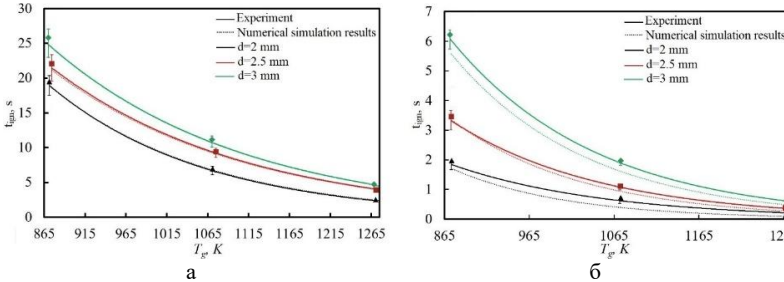


Рис 1. Зависимость времени задержки воспламенения композитных топливных частиц (уголь/вода/синтетические масла) от температуры окружающей среды: а – 50/45/5; б – 50/0/50.

Анализ зависимостей $t_{ign}(T_g)$ (рис. 1) показывает, что время задержки зажигания топливных композитов, не содержащих в своём составе воды (рис. 1,б), значительно меньше времён задержки зажигания обводненных топлив (рис. 1,а). Видно хорошее соответствие экспериментальных и теоретических данных.

Список литературы

1. **Choudhury, P.R.**, 1992. Slurry fuels. Progress in Energy and Combustion Science. 18, 409-427. https://doi.org/10.1016/0360-1285(92)90008-O.
2. **Delyagin, G.N.**, 1980. Prospects and advantages of coal combustion in the form of coal-water suspensions. Problems of heat and mass transfer in combustion processes used in power engineering: materials of the international school-seminar. - Minsk: ITMO AN BSSR, 3- 17.
3. **Krut A.A.**, 2009. Coal-water fuel - an alternative to natural gas and liquid petroleum products. Geotechnical mechanics. 83, 269-274.
4. **S.V. Syrodoy, G.V. Kuznetsov, A.V. Zakharevich, N.Y. Gutareva, V.V. Salomatov.** The influence of the structure heterogeneity on the characteristics and conditions of the coal–water fuel particles ignition in high temperature environment. Combustion and Flame 180 (2017) pp. 196-206.
5. **G.V. Kuznetsov, D. Yu Malyshev, Zh.A. Kostoreva, S.V. Syrodoy, N. Yu. Gutareva**, The ignition of the bio water-coal fuel particles based on coals of different degree metamorphism, Energy, Volume 201, 2020, https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117701.

Работа выполнена при финансировании из средств гранта РНФ 18-79-10015.

УДК 681.518:536.52:662.6

В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Н.А. Шмакова

Вятский государственный университет, Киров, 610000, Московская, 36

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ КОТЛОВ ПРИ СЖИГАНИИ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ

Температура продуктов сгорания является важным параметром, характеризующим теплонапряженность и кпд котла. Стремление повысить кпд котла за счет повышения температуры продуктов сгорания в топке может привести к обратному эффекту, особенно при сжигании торфа и угля. Летучая зола, состоящая из оксидов (SiO_2, Fe_2O_3, Al_2O_3 и т.д.), плавится при высокой температуре, загрязняя теплосъемные поверхности и снижая кпд котла. Кроме того, при неэффективном сжигании топлива возможно образование оксидов азота, которые могут быть причиной кислотных дождей. Поэтому так важно контролировать температуру топки котла. Точный пирометрический контроль способствует поддержанию оптимальной рабочей температуры факела. Эти проблемы исследуются многими авторами, при этом решение достигается в основном изменением конструкции котла [1, 2]. Разработка информационной системы позволит повысить эффективность работы котлоагрегата без реконструкции.

Разрабатываемая информационная система позволит корректно задавать параметры для определения температуры внутри топок энергетических и водогрейных котлов. Это обеспечит точный пирометрический контроль температуры продуктов сгорания и отложений на стенках теплосъемных поверхностей при сжигании твердых топлив. Для определения оптимальных параметров в информационную систему задается тип котла, нагрузка, расход и состав топлива (влажность, зольность, содержание углерода, серы и т.д.), коэффициент избытка воздуха и др. Для заданных условий определяются значения излучательной способности (степени черноты) в разных участках спектра излучения продуктов сгорания. Характеристики излучения F_λ и ε_λ рассчитываются по методике [3]. В качестве примера на рис.1 приведены характеристики излучения, рассчитанные при разных температурах. Расчетные значения степеней черноты выставляются на пирометрах и определяется температура продуктов сгорания. На основании полученных данных по температуре программа дает рекомендации машинисту по ведению режима работы котельного агрегата.

Определение завышения температуры топочных газов позволяет предотвратить выбросы оксидов азота, а определение завышения тем-

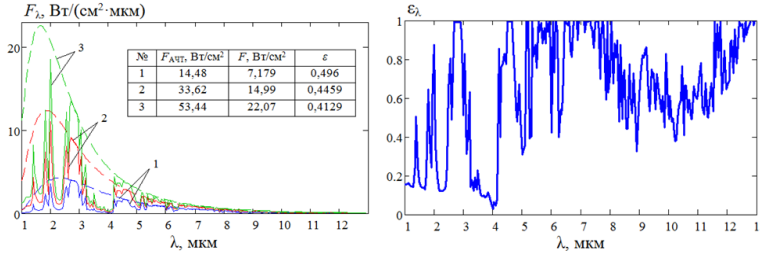


Рис. 1. Спектральная плотность потока и спектральная степень черноты продуктов сгорания (при T=1273 К). 1 –расчет и функция Планка при T = 1273 К, 2 – расчет при T = 1573 К, 3 – расчет при T = 1773 К.

пературы частиц летучей золы по высоте топки котла позволяет предотвратить шлакование поверхностей нагрева и как следствие уменьшит время между регламентными чистками котла. Применение информационной системы планируется на паровых и водогрейных котлах предприятий ТЭК и ЖКХ Кировской области (котлы марки БКЗ-210-140Ф и КЕВ 6,5-14-115-СОсоответственно). Апробация системы на базе Кировской ТЭЦ-4 позволит применять её и на других предприятиях России.

Список литературы

1. **Волков Э.П., Архипов А.М., Прохоров В.Б., Чернов С.Л.** Повышение экологической безопасности, надёжности и экономичности пылеугольных котлов // Проблемы региональной энергетики 1 (33), 2017. С. 45-53.
2. **Ткаченко Д.С., Осинцев К.В.** Повышение эффективности сжигания экибастузского угля на котле П-57 ст.№8 Троицкой ГРЭС путем замены горелочных устройтв // Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. 2018. Т. 6. № 1. С. 194-196.
3. **Кузьмин В.А., Маратканова Е.И., Заграй И.А., Рукавишникова Р.В.** Тепловое излучение гетерогенных продуктов сгорания в факеле модельного ракетного двигателя // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Том 22. № 3. С. 385–400.

V.A. Kuzmin, I.A. Zagrai, N.A. Shmakova

Vyatka State University, Russia, 610000 Kirov, Moscovskaya, 36

DEVELOPMENT OF THE INFORMATION SYSTEM FOR DETERMINING THE OPTIMAL TEMPERATURE CONDITIONS IN BOILERS FOR SOLID-FUEL COMBUSTION

УДК 621.434

Р.З. Кавтарадзе, А.А. Зеленцов, А.А. Касько

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Москва, 105005, 2-ая Бауманская, 5 (•)

ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА АВИАЦИОННОГО РОТОРНО-ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Массогабаритные характеристики роторно-поршневых двигателей (РПД) хорошо подходят для применения в летательных аппаратах. Учитывая развитие методов численного моделирования, это открывает новые перспективы исследования и расчетов РПД с применением как 0-1-мерных, так и 3-х мерных подходов [1].

В ходе выполнения работы проведена обработка экспериментальных данных, полученных на тормозном стенде в ЦИАМ им. П.И. Баранова. В процессе эксперимента фиксировались эффективные параметры двигателя, а также значения давления в камере сгорания (датчик в районе сечи зажигания), давление и температура газа на впуске и выпуске.

Данные полученные в ходе проведения эксперимента были использованы для верификации 3-х мерной математической модели сгорания. Для этих целей на основе твердотельной модели авиационного роторно-

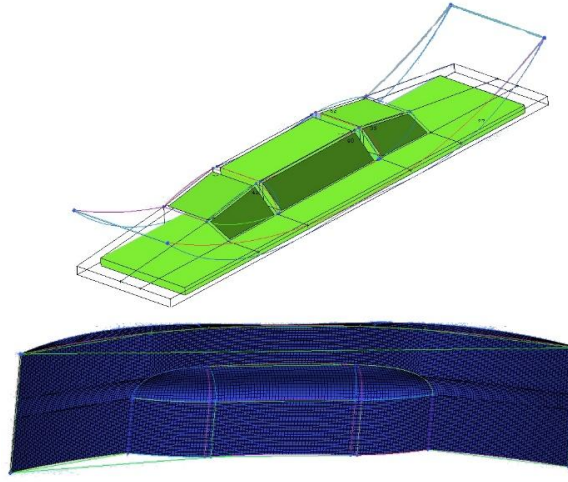


Рис. 1. Топология блоков и сетка расчетной области камеры сгорания.

(•) Р.З. Кавтарадзе, kavtaradzerz@mail.ru / А.А. Зеленцов, zelentsov.aa@gmail.com / А.А. Касько, kasko_73@mail.ru

поршневого двигателя была получена расчетная область путем булевых операций с моделями. Расчетная область включает в себя: камеру сгорания (область, ограниченную поверхностью ротора, поверхностью статора и поверхностью торцевых пластин), впускные и выпускные каналы, а также форкамеры в области свечных каналов.

Сетка для деформируемой области камеры сгорания была построена при помощи ICEM CFD. Это в первую очередь инструмент, нацеленный на создание структурированных гексаэдрических сеток высокого качества. Таким образом это дает возможность хорошо описать криволинейную форму камеры сгорания и сохранить высокое качество сетки для дальнейшего устойчивого расчета (см. рис. 1).

Расчет рабочего процесса и верификация модели сгорания проводились в ПК «AVL Fire» [1], с использованием экспериментальных данных. Импортированная сетка деформировалась и перемещалась в пространстве по заданному закону, который соответствовал планетарному движению ротора.

В ходе работы были получены коэффициенты для модели сгорания в авиационных роторно-поршневых двигателях, что позволит продолжить исследование в этой области и сократит затраты на поиски формы камеры теле ротора.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №18-08-00275а).

Список литературы

1. FIRE. Users Manual Version 2019.2 / AVL List GmbH. Graz (Austria), 2020. (License Agreement for Use of the Simulation Software AVL Boost be-tween Moscow State Technical Univ. n.a. N.E. Bauman and AVL List GmbH, 2014).

R.Z. Kavtaradze, A.A. Zelentsov, A.A. Kasko

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

VERIFICATION OF THE OPERATING PROCESS MODEL OF AIRCRAFT ROTARY PISTON ENGINE

УДК 621.175

А.П. Железнов, В.С. Крылов, Д.В. Брдынкевич

ЗАО НПВП «Турбокон», Калуга, 248010, Комсомольская Роща, 43

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ СМЕСИ ГАЗОВ В СОСУДЕ ЗАМКНУТОГО ОБЪЕМА В УСЛОВИЯХ ВАКУУМА

В настоящее время актуален вопрос повышения КПД электростанций. Одним из способов увеличения КПД паротурбинной установки (ПТУ) – повышение начальной температуры пара в цикле. На сегодняшний день существуют котлы на сверхкритические параметры с температурой пара 600...620 °С и давлением до 30 МПа. Для дальнейшего увеличения температуры перегрева пара требуются применение жаропрочных и жаростойких сплавов для изготовления теплообменных поверхностей паровых котлов. Альтернативой является внедрение дополнительного газового парового перегревателя (ДГПП), в котором можно повысить температуру пара до 750...850 °С, путем перегрева в сжигаемой метано – кислородной смеси.

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$$

В процессе эксплуатации таких установок с ДГПП возникает ряд проблем, одна из которых – это поступление в конденсатор CO_2 и остатков несгоревшей смеси CH_4 и O_2. Так как эта смесь является взрывоопасной, что является угрозой для конденсатора, то необходимо проверить способность воспламеняться смеси в условиях вакуума. Для данной цели создан экспериментальный стенд в МНИЛ им.В.А.Федорова при ЗАО НПВП «Турбокон», представленный на рис.1.

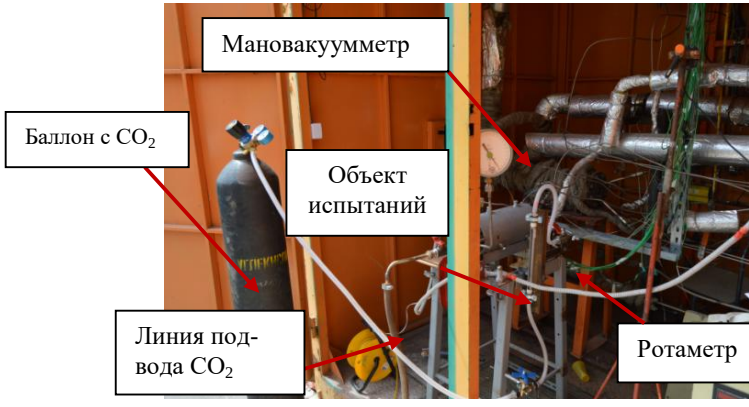


Рис.1 - Общий вид испытательного стенда

Эксперимент выполнялся для 20 различных режимов с изменением концентрации CH_4,O_2 и CO_2 в горючей смеси, при давлении в замкнутом сосуде в диапазоне p = 10,8...13,06 кПа. Запись показаний манова-кууметра фиксировалась при помощи видеосъемки для получения распределения величины давления по времени в момент воспламенения смеси. На рис.2 представлена схема рабочей части стенда.

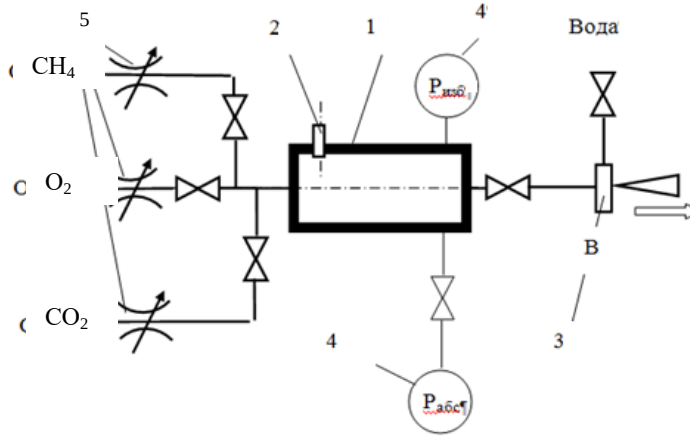


Рис.2 – Схема рабочей части стенда
1 – Герметичный сосуд; 2- Свеча зажигания; 3 – Водоструйный эжектор;
4 – Манометры; 5 – Расходомерные устройства.

В ходе проведения эксперимента получены следующие результаты:
при соотношение смеси кислород - метан n = 1,25 без подачи CO_2 – взрыв наблюдается;
при неизменном соотношении метана и кислорода с ростом расхода CO_2 до 33 нм^3/ч и выше – взрыв не наблюдается;при соотношении n = 2, что является близким к стехиометрии, с увеличением расхода CO_2 до 45 нм^3/ч – взрыв наблюдается. При дальнейшем увеличении расхода CO_2 – взрыв перестает наблюдаться.

Список литературы

1. Б.Льюис, Г.Эльбе «Горение, пламя и взрывы в газах», Москва, Издательство: «Мир», 1968
2. Э.А.Манушин «Комбинированные энергетические установки с паровыми и газовыми турбинами», Москва, 1990

IGNITION OF A MIXTURE OF GASES IN A CLOSED-VOLUME VESSEL UNDER VACUUM

УДК 621.9

К.М. Моисеева[1], *А.Ю. Крайнов*[1], *В.А. Порязов*[1]

[1] Томский государственный университет, Томск, 634050, пр. Ленина, 36

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ГОРЕНИИ МЕТАЛЛИЗИРОВАННОГО СМЕСЕВОГО ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Доклад посвящен решению задачи о горении металлизированного смесевого твердого топлива на основе подходов механики двухфазных реагирующих сред [1]. Представлены результаты численного исследования задачи горения металлизированного смесевого твердого топлива (МСТТ) с учетом газодинамических эффектов, возникающих над поверхностью горения МСТТ. Рассчитана линейная скорость горения МСТТ на основе феноменологической модели [2].

При постановке задачи приняты следующие допущения. МСТТ состоит из окислителя, связки и порошка металла. Для исследования выбрано МСТТ, содержащее порошок алюминия, и МСТТ, содержащее частицы бора. Физико-математическая постановка задачи учитывает процессы над поверхностью горящего МСТТ и учитывает тепловое, динамическое и инерционное взаимодействия между газом и частицами. Взаимодействие между газом и частицами описывается по моделям [3 – 4]. Горение частиц алюминия и бора описывается по моделям, предложенным в [3 – 4]. Физико-математическая постановка задачи определяется уравнениями сохранения массы, импульса и энергии газа и частиц, дополненными уравнениями сохранения массы компонентов газа, сохранения счетной концентрации частиц. Метод решения задачи основан на алгоритмах распада произвольного разрыва С. К. Годунова и А. Н. Крайко.

Результаты решения задачи горения МСТТ, содержащего частицы алюминия частично представлены на рис. 1. Полученные результаты совпадают с данными известных экспериментальных исследований, опубликованными в научной литературе [5]. Продолжением работы стало исследование горения МСТТ с порошком бора. По известным данным, полученным в экспериментальных работах, была определена кинетика окисления и горения частиц бора в составе смесевого металлизированного твердого топлива.

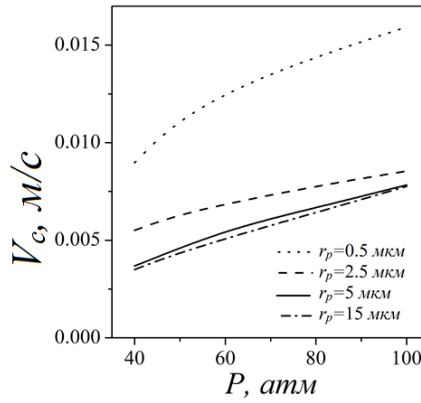


Рис. 1. Зависимость линейной скорости горения смесевого твердого топлива от давления окружающей среды.

Проведено параметрическое исследование влияния констант в законе скорости горения частицы бора, а также влияние величины теплового потока к поверхности топлива на линейную скорость горения МСТТ с порошком бора.

Список литературы

1. Динамика многофазных сред / Р. И. Нигматулин. Москва: Наука, 1987.
2. **Hermance C. E.** A model of composite propellant combustion including surface heterogeneity and heat generation // AIAA J. 1966. Vol. 4. No. 9. Pp. 1629−1637.
3. **Порязов В. А., Крайнов А. Ю.** Расчет скорости горения металлизированного твердого топлива с учетом распределения агломератов по размерам // ИФЖ. 2016. Т. 89. № 3. С. 568–574.
4. Искровое зажигание горючих газов и газовзвесей: монография // К. М. Моисеева, А. Ю. Крайнов. Томск: STT, 2020. – 124 с.
5. **Архипов В. А., Горбенко Т. И., Горбенко М. В., Попок В. Н., Савельева Л. А.** Влияние каталитических добавок на горение гетерогенных систем, содержащих ультрадисперсный алюминий // Известия вузов. Физика. 2007. Т. 50. № 9/2. С. 12-16.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10054).

K.M. Moiseeva [1], A.Yu. Krainov[1], V.A. Poryazov[1]

[1] Tomsk State University,
Russia 634050 Tomsk, Lenina, 36

MATHEMATICAL MODELING OF HEAT EXCHANGE PROCESSES DURING COMBUSTION OF METALLIZED MIXED SOLID FUEL

УДК 536.7

Т. Ло, А.Ю. Чирков

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, 2-ая Бауманская, 5, стр. 1(•)

РАСЧЁТ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СМЕСЕЙ В ДВУХФАЗНОМ РАВНОВЕСИИ

Расчет термодинамических свойств смесей в фазовом равновесии является важным элементом моделирования химических процессов, таких как дистилляция и экстракция. Уравнения состояния для описания фазового равновесия и физических свойств обычно используются в широком диапазоне давления, температуры и состава смеси. Поскольку классические кубические уравнения состояния не удовлетворяют требованиям к точности некоторых термодинамических свойств во всей интересующей области, то для описания этих свойств необходимо использование более сложны высокоточных уравнений состояния.

Одним из таких высокоточных уравнений состояния является уравнение GERG-2008, явно выраженное в виде энергии Гельмгольца как функции плотности, температуры и состава, включая идеально-газовую часть и эмпирическую остаточную часть [1]:

$$\alpha(\delta,\tau,\bar{x}) = \alpha^0(\rho,T,\bar{x}) + \alpha^r(\delta,\tau,\bar{x})$$

где $\bar{x}$ - молярный состав смеси, δ - приведенная плотность смеси, а τ - обратная приведенная температура смеси.

Для смеси состава $\bar{x}$ при заданном давлении p и температуре T сначала выполняется анализ устойчивости, чтобы проверить, является ли исходная фаза смеси стабильной или она распадается на две (или более) фазы. Если исходная фаза смеси оказывается неустойчивой, то впоследствии выполняется расчет фазового равновесия. Алгоритм расчета фазового равновесия «Пар-Жидкость», реализованный в разработанном нами расчетном коде на основе уравнения состояния GERG-2008, выглядит следующим образом [2].

i) Вводится заданное давление p, температуру T, состав $\bar{x}$, а также параметры и коэффициенты, необходимые в уравнениях состояния GERG-2008;

ii) Проводится анализ устойчивости. Анализ основан на критерии касательной плоскости, который впервые был введен в [3]. Эффективный подход к анализу устойчивости был предложен в [4].

iii) В результате анализа устойчивости, исходная фаза смеси идентифицируется как устойчивая или неустойчивая. Если исходная фаза неустойчива, т.е. распадается на две (или более) фазы (учитывается

(•) Т. Ло, luotaiming@yandex.ru

только фазовое равновесие «Пар-Жидкость»), выполняется расчет парожидкостного равновесия. Критерий касательной плоскости в процессе анализа устойчивости также может дать начальные оценки для решения системы уравнений фазового равновесия.

iv) При расчете парожидкостного равновесия, сначала используется метод последовательных приближений для решения системы уравнений фазового равновесия. Если сходимость не получена, рекомендуется минимизация энергии Гиббса методом второго порядка [5, 6].

Список литературы

1. **Kunz O., Wagner W.** The GERG-2008 wide-range equation of state for natural gases and other mixtures: an expansion of GERG-2004 // Journal of Chemical & Engineering Data. 2012. V. 57, No. 11. P. 3032 – 3091.
2. **Luo T., Chirkov A.Y.** Phase equilibrium modelling for multi-component mixtures using highly accurate Helmholtz energy equation of state // International Journal of Engineering Systems Modelling and Simulation. 2020. V. 11, No. 4. P. 138-146.
3. **Baker L.E., Pierce A.C., Luks K.D.** Gibbs energy analysis of phase equilibria // Society of Petroleum Engineers Journal. 1982. V. 22, No. 5. P. 731 – 742.
4. **Michelsen M.L.** The isothermal flash problem. Part I. Stability // Fluid Phase Equilibria. 1982. V. 9, No. 1. P. 1 – 19.
5. **Michelsen M.L.** The isothermal flash problem. Part II. Phase-split calculation // Fluid Phase Equilibria. 1982. V. 9, No. 1. P. 21 – 40.
6. **Michelsen M.L., Mollerup J.M.** Thermodynamic models: fundamentals & computational aspects. Holte: Tie-Line Publications, 2004.

T. Luo, A.Y. Chirkov

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

CALCULATION OF THERMODYNAMIC PROPERTIES OF MIXTURES IN TWO-PHASE EQUILIBRIUM

УДК 621.9

М.К. Handawy, А.Ю. Снегирёв

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

ВЛИЯНИЕ КАТАЛИЗАТОРОВ НА ТЕРМИЧЕСКОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ ПОЛИМЕРОВ В КИСЛОРОДНОМ МИКРОКАЛОРИМЕТРЕ

Управление термическим разложением полимерных материалов с помощью катализаторов представляет значительный практический интерес для оптимизации технологий переработки пластмасс в составе твёрдых бытовых отходов. Традиционным методом исследования кинетики термического разложения является термогравиметрия, которая не даёт информации о горючести газообразных продуктов. В данной работе используется метод сканирующей кислородной микрокалориметрии [1, 2], нацеленный на измерение теплоты сгорания летучих при нагреве исследуемого образца в азоте с постоянной скоростью роста температуры. Указанный метод впервые используется для исследования влияния катализаторов (ZSM, MgO) на термическое разложение практически важных полимеров (ПЭ, ПК, ПЭТ, ПП, ПММА).

В экспериментах рассматривается термическое разложение чистых полимеров и полимеров с добавлением до 30 % массы катализатора. Результаты измерений представляют зависимости мощности тепловыделения при окислении летучих, отнесённой к начальной массе образца, от температуры образца при разных скоростях нагрева. Эти данные используются для анализа термической устойчивости смеси материала, а также для построения формально-кинетических моделей термического разложения и определения эффективных кинетических параметров.

Установлено, что наиболее сильным из рассмотренных в данной работе катализаторов термического разложения является алюмосиликатный цеолит ZSM-5, а каталитический эффект особенно выражен для полностью газифицирующихся термопластиков. Как показано на Рис. 1, добавление 10 % этого катализатора к полиэтилену высокой плотности (ПЭВП) сдвигает температурный диапазон термического разложения примерно на 90 К в сторону более низких температур, а влияние дальнейшего увеличения массы добавленного катализатора значительно слабее. На Рис. 2 показано, что добавление катализатора очень сильно (почти вдвое) снижает эффективную энергию активации термического разложения ПЭВП, которая, как и для чистого полимера, слабо зависит от глубины превращения (это указывает на доминирование одной стадии в реакционном механизме).

Влияние катализаторов на обугливающиеся термосеты также за-

метно, но менее выражено, чем в случае термопластиков. По-видимому, это обусловлено затруднённым контактом частиц катализатора с полимером из-за образования кокса.

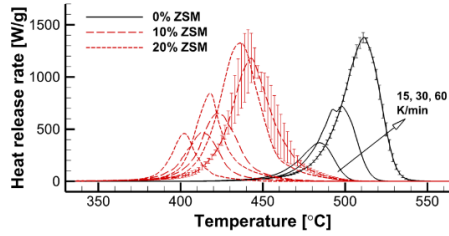


Рис. 1. Влияние катализатора ZSM на термическое разложение полиэтилена высокой плотности. Показаны зависимости мощности тепловыделения при окислении летучих от температуры образца при трёх скоростях нагрева.

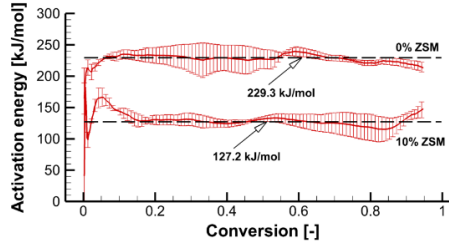


Рис. 2. Зависимость эффективной энергии активации термического разложения полиэтилена высокой плотности от глубины превращения в отсутствие катализатора (0% ZSM) и при добавлении 10 % ZSM.

Список литературы

1. **Snegirev A.Yu.**, **M.K. Handawy**, **V.V. Stepanov**, **V.A. Talalov**. Pyrolysis and combustion of polymer mixtures: Exploring additivity of the heat release rate // Polymer Degradation and Stability. 2019. Vol. 161. P. 245–259.
2. **А.Ю. Снегирёв**, **В.А. Талалов**, **В.В. Степанов**. Исследование горючести материалов методом кислородной микрокалориметрии / Труды 6й Российской национальной конференции по теплообмену РНКТ-6 (Москва, 27–31 октября 2014 г.). Секция 3. Тепломассообмен при химических превращениях. Москва, МЭИ, 2014, 4 С.

M.K. Handawy, A.Yu. Snegirev

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

THE EFFECT OF CATALYSTS ON THERMAL DECOMPOSITION OF POLYMERS IN OXYGEN COMBUSTION CALORIMETER

УДК 662.612

А.Ю. Клюев, А.И. Гурьянов

ФГБОУ ВО Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьёва,
152934, Рыбинск, Пушкина ул., 53

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАСШТАБНОГО ФАКТОРА НА ГОРЕНИЕ МЕТАНОВОЗДУШНЫХ ДИФФУЗИОННЫХ И ПЕРЕМЕШАННЫХ СТРУЙ

Уровень развития техники растет с каждым годом. Появляются портативные технические устройства, затрачивающие большое количество электроэнергии на обеспечение своего функционирования. Автономными источниками энергии для таких устройств являются, пользующиеся большей популярностью, литий-ионные батареи, которые имеют низкую энергетическую плотность, около 200 Втч/кг [1,2,3], что не позволяет обеспечить стабильную продолжительную работу. Альтернативой электрохимическим батареям предлагаются источники энергии на основе углеводородного топлива, в которых химическая эксергия реагирующих веществ в микрокамере сгорания преобразуется в тепловую энергию. Последняя с использованием термопреобразователей переходит в электрическую энергию.

Одним из основных факторов развития компактных источников энергии на основе углеводородного топлива является их плотность энергии, которая в 40-75 раз больше, чем у применяемых в технике аккумуляторов [4].

Проектирование микрокамер сгорания требует понимания закономерностей процесса горения и структуры пламени на микромасштабном уровне. Для понимания физики процесса выполнен расчет на трех пространственных масштабах: 10^{-2},10^{-3},10^{-4} м. Расчетная модель представляла собой коаксиальный воздушный канал с расположенным внутри цилиндрическим каналом подвода топлива. Численное моделирование выполнено в стационарной и нестационарной трехмерной постановке.

Анализ результатов численного исследования позволил получить распределение газодинамических и термохимических параметров процесса горения с учетом влияния масштабного фактора.

Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение фундаментальных научных исследований на 2020 год и плановый период 2021 и 2022 годов (шифр научной темы 0774-2020-0004).

Список литературы

1. **Fernandez-Pello, A.C.** Micropower generation using combustion: issues and approaches [Text] / A.C. Fernandez-Pello // Proceedings of the Combustion Institute 2002;29:883-99.
2. **Kang, K.** Electrodes with high power and high capacity for rechargeable lithium batteries [Text] / K. Kang, YS. Meng, J. Breger, CP. Grey, G. Ceder // Science 2006;311(5763): 977-80.
3. **Ju, Y.** Micro-combustion: technology development and fundamental research [Text] / Y. Ju, K. Maruta // Prog Energy Combust Sci 2011;37(6):669–715.
4. **Chou, S.K.** Development of micro power generators – A review [Text] / S.K. Chou, W.M. Yang, K.J. Chua, J. Li, K.L. Zhang // National University of Singapore 2010;16.

A.Y. Klyuev, A.I. Guryanov

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

A STUDY OF THE EFFECT OF SCALE FACTOR ON THE COMBUSTION OF METHANE-AIR DIFFUSION AND MIXED JETS

УДК 007.51

Н.И. Чухин, А.И. Счастливцев

Объединенный институт высоких температур РАН,
111116, Москва, Красноказарменная, 17А

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В ГАЗОГЕНЕРАТОРЕ ВОДОРОДО-ВОЗДУШНОЙ СИСТЕМЫ АККУМУЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГИИ

Одним из ключевых новых элементов водородо-воздушных систем долгосрочного аккумулирования энергии [1-3] является водородно-воздушный генератор газа (ВВГГ). Целью работы было получение экспериментальных данных по параметрам газодинамических процессов генерации газа в широком диапазоне расходов топлива, окислителя и балластировочного компонента (воздуха). Экспериментальный образец ВВГГ для исследований процессов состоял из смесительной головки, камеры сгорания, сопла-имитатора, фланца, воздушной рубашки с уплотнительным кольцом. Был использован экспериментальный стенд ОИВТ РАН для испытаний водородосжигающих установок мощностью до 200 кВт [3].

В ходе испытаний экспериментального образца были проведены два настроечных и два контрольных пуска с ожидаемой тепловой мощностью 60 и 72 кВт. Были определены оптимальный режим запуска ВВГГ, осуществлена настройка циклограммы, проведен отбор газа в специальный бак для проведения анализа на содержание оксидов азота (NO_x), проведено дополнительное исследование для изучения аварийного режима работы ВВГГ, проведена дефектация внутренней охлаждаемой вставки.

Результаты проведенных испытаний позволили определить режимы запуска ВВГГ, при которых не происходит прекращение подачи водорода. Также установлено, что при подаче больших количеств охлаждающего воздуха из баллонов высокого давления может происходить замораживание редуктора высокого давление и нарушение его работы. В целом результаты испытаний новой конструкции экспериментального образца смесительного элемента ВВГГ показали, что планируемые значения температур газа были достигнуты и не превышают критических значений.

Осмотр охлаждаемой заменяемой вставки показал, что наиболее теплонапряженная зона находится на расстоянии 7…9 см от огневого дна смесительного элемента. Поэтому для повышения надежности камеры сгорания в этой области необходимо осуществлять дополнитель-

ное охлаждение либо снижать тепловые нагрузки за счет увеличения диаметра камеры сгорания.

Список литературы

1. **S.M. Alirahmi, A.R. Razmi, A. Arabkoohsar.** Comprehensive assessment and multi-objective optimization of a green concept based on a combination of hydrogen and compressed air energy storage (CAES) systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 142 (2021), 110850. 10.1016/j.rser.2021.110850.
2. **Schastlivtsev A I, Dunikov D O, Borzenko V I and Shmatov D P** 2020 Hydrogen-Oxygen Installations for the Energy Industry High Temperature 58 733-43
3. **Schastlivtsev A, Dunikov D, Borzenko V.** Experimental study of the processes in hydrogen-oxygen gas generator. International Journal of Hydrogen Energy. 2019;44(18):9450-9455.

N.I. Chukhin, A.I. Schastlivtsev

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

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF THE PROCESSES IN GAS GENERATOR OF HYDROGEN-AIR ENERGY STORAGE

УДК 536; 661.96

Д.В. Блинов[1,2], *В.И. Борзенко*[1], *Бездудный А.В.*[1]

[1] Объединенный институт высоких температур РАН,
111116, Москва, Красноказарменная, 17А
[2] Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Россия, г. Москва, Красноказарменная улица, дом 14

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В МЕТАЛЛОГИДРИДНОМ РЕАКТОРЕ ХРАНЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Актуальность вопроса создания различных систем циклического аккумулирования тепловой энергии определяется ростом интереса к энергосистемам на базе возобновляемых источников. В настоящий момент распространение получили стационарные системы на базе фазового перехода, физического хранения, сжатого воздуха, химических переходов и др. [1]. Перспективными материалами для комплексных решений хранения тепловой энергии являются металлогидриды – химическое соединение водорода с металлом или интерметаллическим сплавом.

Главной особенностью процесса сорбции водорода является высокая теплота реакции – порядка 40 кДж/моль.

В наиболее развитом направлении применения металлогидридов: хранении и очистке водорода, это является основным техническим барьером, так как, вкупе с низкой теплопроводностью металлогидридной засыпки, приводит к возникновению режимов, характеризующихся кризисом массообмена [2]. С другой стороны, это же позволяет использовать металлогидридное устройство как источник тепла при проведении процесса сорбции водорода.

Цель данной работы – проведение анализа и экспериментальные исследования применимости одноступенчатых металлогидридных систем в качестве устройства обратимого хранения тепловой энергии.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований тепловых, массообменных и динамических характеристик процессов в металлогидридном реакторе хранения тепловой энергии. В реакторе находится интерметаллический сплав $LaFe_{0.1}Mn_{0.3}Ni_{4.8}$ в количестве 5 кг. Максимальная ёмкость реактора по водороду составляет 850 норм.л. Получены данные по тепловой мощности и ёмкости системы теплового аккумулирования. Предложены способы интенсификации процессов.

Список литературы

1. **Б.Д. Бабаев.** ПРИНЦИПЫ ТЕПЛОВОГО АККУМУЛИРОВАНИЯ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ // ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР, 2014, том 52, № 5, с. 760–776.
2. **Borzenko V.I., Dunikov D.O., Malyshenko S.P.** Crisis phenomena in metal hydride hydrogen storage facilities // High Temperature. 2011. Т. 49. № 2. с. 249-256.

D.V. Blinov [1,2], V.I. Borzenko[1], A.V. Bezdudny[1]

[1] Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences,
Russia, 111116 Moscow, Krasnokazarmennaya, 17A
[2] National Research University "MPEI",
Russia, 111250 Moscow, Krasnokazarmennaya, 14

EXPERIMENTAL RESEARCH OF METAL HYDRIDE HEAT STORAGE REACTOR PROCESSES

СЕКЦИЯ 6

Прикладные задачи тепло-массообмена:
интенсификация и эффективность

УДК 536.24

К.О. Пономарев[1]

[1] Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Томск, Усова, 7

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОДИФИКАЦИИ ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КРЫШЕК ТЕРМОСИФОНА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ВЫСОТЕ УСТРОЙСТВА

Обеспечение регламентного температурного режима теплонагруженных устройств является одной из актуальных проблем в области теплофизики [1]. Перспективным решением этой проблемы является применение систем охлаждения на базе термосифонов (ТС), в которых теплоноситель циркулирует по замкнутому испарительно-конденсационному циклу в виде капель и пленок жидкости. Интенсифицировать тепломассоперенос в ТС можно за счет модификации поверхностей теплообмена лазерными методами [2, 3].

Целью работы являлось экспериментальное определение влияния модификации внутренних поверхностей крышек термосифона на распределения температуры по высоте устройства.

Эксперименты проведены на установке, принцип работы которой приведен в [1].

Установлено, что с ростом теплового потока, подведенного к нижней крышке термосифона, температура крышки испарителя увеличивается интенсивнее, чем температура крышки конденсатора. Как следствие перепад температуры по высоте испарителя в квазистационарных режимах работы ТС был выше (в 2-6 раз) чем в конденсационной части.

В диапазоне тепловых потоков от 0.7 до 8.2 кВт/м^2 температуры в термосифонах с полированными и текстурированными крышками лежат в пределах погрешности. Однако с ростом теплового потока от 10 до 15 кВт/м^2 температуры по всей высоте термосифона с текстурированными крышками становились ниже чем температуры в ТС с полированными крышками. Можно предположить, что при малых тепловых потоках (q=0.7-8.2 кВт/м^2) микротекстура внутренней поверхности нижней крышки не оказывает влияния на процессы теплопереноса в ТС. При более высоких q (10-15 кВт/м^2) текстурированная поверхность по сравнению с полированной способствовала интенсификации конвективных течений в слое жидкости, в результате чего переносимый за счет конвекции тепловой поток увеличился и температура нижней крышки уменьшилась. Последнее привело к снижению температуры слоя жидкости на нижней крышке ТС и пара над свободной поверхно-

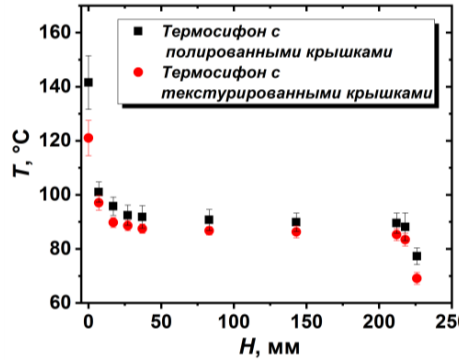


Рис. 1. Распределения температур по высоте термосифона с полированными и текстурированными крышками при q=15 кВт/м^2.

стью этого слоя. Влияние микротекстуры внутренней поверхности верхней крышки ТС на распределения температур в конденсаторе незначительно.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90137.

Список литературы

1. **Kuznetsov G.V., Ponomarev K.O., Feoktistov D.V. [et al.]** New approach to the heat transfer modeling in the coolant layer on the lower cover of a thermosyphon // Int. J. Heat Mass Transf. 2020. Vol. 163. Art. 120555. P. 1–11.
2. **Kuznetsov G.V., Feoktistov D.V., Orlova E.G. [et al.]** Dynamic characteristics of water spreading over laser-textured aluminum alloy surfaces // Colloid. Surf. A-Physicochem. Eng. Asp. 2020. Vol. 603. Art. 125253. P. 1–11.
3. **Kuznetsov G.V., Feoktistov D.V., Orlova E.G. [et al.]** Droplet state and mechanism of contact line movement on laser-textured aluminum alloy surfaces // J. Colloid Interf. Sci. 2019. Vol. 553. P. 557–566.

K.O. Ponomarev [1]

[1] National Research Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634050 Tomsk, Usova, 7

EXPERIMENTAL STUDY OF THE INFLUENCE OF THE THERMOSYPHON COVERS INNER SURFACES MODIFICATION ON THE TEMEPRATURE DISTRIBUTION ALONG ITS HEIGHT

УДК 536.24

С.З. Сапожников[1], *В.Ю. Митяков*[1], *А.В. Митяков*[1], *А.Ю. Бабич*[1], *Э.Р. Зайнуллина*[1]

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

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ВОДЯНОГО ПАРА НА НАКЛОННОЙ ТРУБЕ

Наиболее распространенные методы интенсификации теплообмена при конденсации связаны с развитием поверхности. Оребрение, накатка, облунение усложняют конструкцию теплообменника и повышают его стоимость. Одним из простейших и недооценённых способов повышения коэффициента теплоотдачи (КТО) является наклон труб [1].

Задача исследования – оценить интенсификацию теплообмена при плёночной конденсации воды на наклонных трубах.

Предыдущие работы подтвердили применимость градиентной теплометрии [2] к изучению теплообмена при конденсации. Разработано совмещение теплометрии и термометрии, позволяющее рассчитывать местные КТО [3].

Выполнена серия опытов при конденсации насыщенного водяного пара на наклонных трубах [3]. Экспериментальная установка была собрана по схеме «труба в трубе»: внутренняя выполнена из нержавеющей стали (наружный диаметр – d = 20 мм, толщина стенки – δ = 2 мм), наружная из армированного резинового рукава (внутренний диаметр – d = 60 мм). Среды двигались в противотоке: водопроводная вода подавалась в металлическую трубу снизу при температуре t_{H2O} = 20 °С с расходом 200 мл/с, насыщенный водяной пар с температурой насыщения, близкой к 100 °С, – в межтрубное пространство сверху, расход пара составил 2,8 г/с. На поверхности трубы из нержавеющей стали было установлено 5 градиентных датчиков теплового потока (ГДТП) из монокристаллического висмута. Температура поверхности контролировалась с помощью 5 полуискусственных термопар из композиции сталь 12Х18Н9Т + медь. Для исследования теплообмена при конденсации на наклонной трубе измерительный участок был оснащен устройствами для наклона в диапазоне ψ = 0…90 ° с шагом в 10 ° и поворота в диапазоне азимутального угла φ = 0…180 ° с шагом 15 °.

По результатам экспериментов построены угловые теплограммы в полярных координатах. На рис. 1, а представлен пример, соответствующий отклонению трубы на угол ψ = 20 ° от вертикали. Плотность теплового потока представлена в безразмерном виде: при повороте

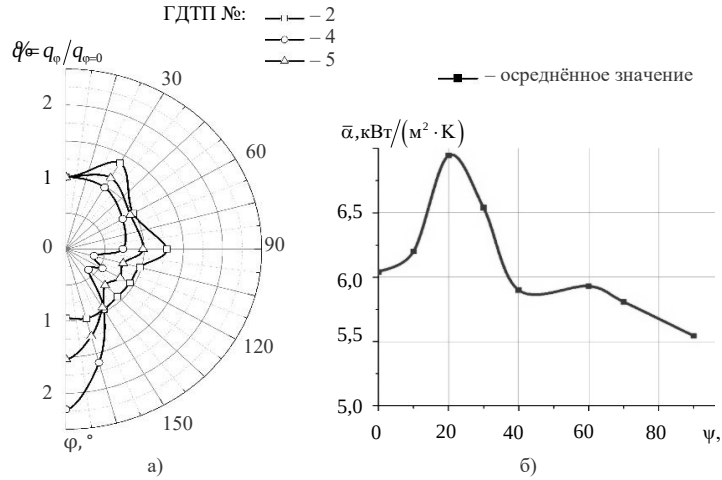


Рис. 1. Результаты эксперимента: а) угловая теплограмма при наклоне на угол ψ = 20 °; б) зависимость среднего КТО от угла наклона ψ.

трубы на угол φ значение плотности теплового потока q_φ относилось к значению в верхней точке $q_{\varphi=0}$.

Средний КТО увеличивается при наклоне на углы ψ = 10…40 ° (рис.1, б.). Максимальный средний КТО соответствует наклону на угол ψ = 20 ° и составляет $\alpha = 6{,}94\ \text{кВт}/\left(\text{м}^2 \cdot \text{К}\right)$, что превышает значение, полученное на вертикальной трубе, на 14,9 %.

Список литературы

1. **Шейнкман А.Г., Линецкий В.Н., Бухман Г.Д., Бродов Ю.М., Савельев Р.З.** Исследование влияния наклона подогревателя низкого давления ПН-65 на эффективность его работы // Гидродинамика и теплообмен. – 1972.
2. **Sapozhnikov S., Mityakov V., Mityakov A.** Heatmetry: The Science and Practice of Heat Flux Measurement. – 2020.- 10.1007/978-3-030-40854-1.
3. **Mityakov, V.Y., Zainullina, E.R., Babich, A.Y., Mityakov, A.V**. Gradient heat flux measurement in study of heat transfer for condensation of water vapour on pipes // Journal of Physics: Conference Series – 2020.– 1565(1), 012015

S.Z. Sapozhnikov[1], V.Yu. Mityakov[1], A.V. Mityakov[1], A.Yu. Babich[1], E.R. Zainullina[1]

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

HEAT TRANSFER ENHANCEMENT DURING CONDENSATION OF WATER STEAM ON INCLINED PIPE

УДК 536.244:66.042.88

П.Д. Алексеев, Ю.Л. Леухин

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

ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООТДАЧИ СТРУЙНОГО МОДУЛЬНОГО РЕКУПЕРАТОРА

Модульные рекуператоры имеют высокую тепловую эффективность, просты в эксплуатации, легко встраиваются в вертикальные и горизонтальные газоходы, имеют возможность набирать любую требуемую поверхность теплопередачи за счет выбора необходимого количества модулей.

Целью настоящей работы является исследование аэродинамики и теплоотдачи модульного струйного рекуператора, с целью разработкой конструкции с более высокой тепловой эффективностью.

Струйный модульный рекуператор работает следующим образом: холодный воздух подается во внутреннюю трубу 1 (рис. 1), перфорированную выдувными отверстиями, из которой он, в виде системы импактных струй, подается на внутреннюю поверхность теплопередающей трубы 2 и нагревается. Сам модуль устанавливается в горизонтальный газоход 3 и омывается снаружи уходящими из энерготехнологической установки дымовыми газами.

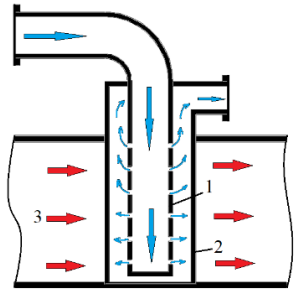


Рис. 1. Схема струйного модульного рекуператора: 1 – внутренняя перфорированная труба; 2 – наружная труба; 3 – газоход.

Численные исследования выполнены на модели с рабочей длиной теплообменной поверхности (трубы 2 на рис. 1) 1390 мм и внутренним ее диаметром 100,5 мм. Внутренняя труба, перфорированная отверстиями диаметром 3,5 мм, имела наружный диаметр 60,5 мм или 75,5 мм. Отверстия по длине внутренней трубы располагались в коридорном или шахматном порядках, в 33 ряда с постоянным шагом равным 42 мм. Количество отверстий в каждом ряду равнялось 5. В отдельном исследовании продольный шаг уменьшался в 2 раза, а количество рядов увеличивалось до 65, при этом отверстия располагались в шахматном порядке.

Численный эксперимент осуществлялся с использованием программного комплекса ANSYS Fluent 15.0. Расчет производился на неструктурированной тетраэдрической сетке с количеством ячеек равным

9 млн. Верификация результатов численного моделирования теплоотдачи осуществлялась на опытных данных, полученных на физической модели струйного модульного рекуператора с аналогичными геометрическими размерами и граничными условиями. Расхождение величин средних по поверхности коэффициентов теплоотдачи в численном и физическом экспериментах не превышает 4%.

В работе установлено, что на внутренней поверхности обдуваемой струями трубы 2 наблюдается значительная неравномерность распределения плотности теплового потока в азимутальном и продольном направлениях. Причем выявленная неравномерность увеличивается при изменения расположения выдувных отверстий с коридорного порядка на шахматный.

С увеличением количества выдувных отверстий и неизменном расходе воздуха через устройство, значительно снижается интенсивность теплоотдачи в направлении выходного сечения (рис.2 а, выход подогретого воздуха слева). При этом средний по поверхности коэффициент теплоотдачи снижается на 21% по сравнению с исходным вариантом. Это объясняется уменьшением скорости истечения струй из отверстий и увеличением сносящего воздействия на них спутного потока.

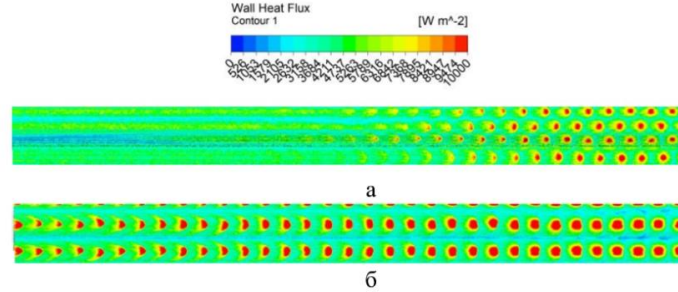


Рис. 2. Распределение плотности теплового потока при 65 рядах отверстий (а) и при диаметре внутренней трубы 75,5 мм (б).

Наиболее равномерная по длине теплоотдача была получена в варианте с наружным диаметром внутренней трубы равным 75,5 мм (рис. 2 б), несмотря на то, что средний коэффициент теплоотдачи в этом случае увеличивался всего на 4%.

P.D. Alekseyev, Yu.L. Leukhin

Northern (Arctic) Federal University,
Russia, 163002 Arkhangelsk, Severnaya Dvina Emb., 17

INVESTIGATION OF AERODYNAMICS AND HEAT TRANSFER OF THE MODULAR JET RECUPERATOR

УДК 536.24

А.В. Пономарев, Ф.В. Пелевин

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Москва, 105005, 2-ая Бауманская, 5(•)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ КАМЕРЫ ЖРД С МЕЖКАНАЛЬНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ СКВОЗЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ СЕТЧАТЫЙ МАТЕРИАЛ

Уменьшить потери давления в регенеративной системе охлаждения, не изменяя габаритных размеров теплообменного тракта, можно, если перейти от общеизвестного продольно-канального к межканальному движению теплоносителя (МКДТ) сквозь металлический сетчатый материал (МСМ), изготовленный методом диффузионной сварки в вакууме высокотеплопроводных металлических тканых сеток [1].

Высокая интенсификация теплообмена достигается за счет принципиально иного метода передачи теплоты от охлаждаемой внутренней стенки в теплоноситель. Теплота отводится от охлаждаемой стенки не за счет конвективного теплообмена как в оребренном тракте, а теплопроводностью по высокотеплопроводному металлическому каркасу пористого материала и далее за счет высокой обьемной теплоотдачи в порах теплоносителю. Чем выше теплопроводность пористого металлического материала, тем большие объемы пористого материала и теплоносителя будет участвовать в теплообмене. Поверхность теплообмена между МСМ и теплоносителем при этом методе передачи теплоты достигает максимально возможной величины.

Особенность расчета ЖРД с МКДТ заключается в том, что расход охлаждающего компонента (теплоносителя) по длине регенеративного тракта охлаждения камеры переменен. При постоянном по длине камеры перепаде давления охлаждающего компонента между подводящими и отводящими каналами и неизменном числе каналов из-за переменного расстояния между каналами в критическом сечении камеры расход охлаждающего компонента будет наибольший. С увеличением расстояния между каналами расход компонента уменьшается, что положительно скажется на равномерности температуры стенки камеры по длине ЖРД. Изменяя пористость, тип сетки в МСМ по длине камеры, можно регулировать расход (скорость) компонента по длине камеры, а значит и температуру огневой стенки камеры. Варьируя этими параметрами можно добиться выравнивания температуры огневой стенки

(•) А.В. Пономарёв, alexmgtu@gmail.com

по длине камеры и уменьшить среднюю температуру внутренней стенки. В области критического сечения коэффициенты гидравлического сопротивления МСМ должны быть минимальны для достижения максимальной скорости и расхода теплоносителя. Высокие значения коэффициентов гидравлического сопротивления МСМ – в области малых удельных тепловых потоков.

Отличие от общеизвестного алгоритма расчета наружного охлаждения ЖРД заключается в нахождении количества компонента m_i протекающего через i участок камеры.

Далее по известной методике поверочного расчета охлаждающего тракта ЖРД, используя экспериментальную зависимость поверхностной теплоотдачи в тракте с МКДТ, определяется температура стенки камеры со стороны охлаждающего компонента $T_{\text{ст.ж}i}$, подогрев компонента на каждом участке разбиения ΔT_i, суммарный подогрев компонента в тракте охлаждения ЖРД.

На основании методики расчета температурного состояния камеры ЖРД с МКДТ разработана компьютерная программа. На примере расчета камеры разгонного двигателя [1] видно, что при заданном постоянном перепаде давления компонента по длине камеры, числе подводящих и отводящих каналов, расход компонента переменен по длине камеры и зависит от расстояния между каналами и от коэффициентов сопротивления МСМ на участках разбиения камеры вдоль продольной оси. При увеличении коэффициентов сопротивления МСМ, уменьшается расход и, следовательно, скорость компонента, а температура стенки камеры со стороны охлаждающего компонента возрастает. Таким образом, можно получить практически постоянную температуру стенки камеры без пика температуры в районе критического сечения.

Список литературы

1. **Пелевин Ф.В., Пономарев А.В., Семенов П.Ю.** К вопросу о применении пористых металлов в регенеративной системе охлаждения жидкостных ракетных двигателей // Известия вузов. Машиностроение, 2014. № 5. С. 10–19.

A.V. Ponomaryov, F.V. Pelevin

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

SIMULATION OF THE TEMPERATURE STATE OF THE LRE CHAMBER WITH INTERCHANNEL MOVEMENT OF THE COOLANT THROUGH A METAL MESH MATERIAL

УДК 621.175

А.Ю. Картуесова, А.В. Птахин, В.С. Крылов

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

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ВАКУУМНОГО КОНДЕНСАТОРА В УСЛОВИЯХ НЕРАВНОМЕРНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Повышение эффективности работы конденсационных устройств паровых турбин с наиболее полным использованием теплоты отработавшего пара для получения электрической энергии при ограниченных объемах охлаждающей воды является одним из основных резервов на теплоэлектростанциях.

По ряду причин может возникнуть отклонение от расчетных условий работы вакуумного конденсатора, например, неравномерное охлаждение теплообменной поверхности, либо неисправности вентилятора (в случае воздушных конденсаторов), наличия локальных присосов воздуха и пр. Одним из последствий неравномерного охлаждения является дополнительный объем несконденсированного пара на выходе из конденсатора, который затем поступает в эжектор. Это приводит к увеличению давления на всасе эжектора и, как следствие, к смещению характеристики конденсатора в зону более высоких давлений.

Целью данной работы являлось проведение расчётно-экспериментального исследования совместной работы конденсатора и газоудаляющего устройства в условиях неравномерного теплосъема в том числе с разработанным техническим решением по повышению эффективности – дроссельными вставками в линию эжектирования.

Была создана экспериментальная установка для исследования влияния неравномерного охлаждения частей поверхности модели конденсатора пара и эффекта от установки дросселей небольшого гидравлического сопротивления в линии отвода парогазовой смеси к газоудаляющему устройству объёмного типа (водокольцевой насос, пароструйный эжектор). В процессе экспериментального исследования получены данные о положительном влияний дросселей, установленных за каждым каналом на линии эжектирования, на работу системы.

Разработанная методика расчета оптимального диаметра дросселя для многосекционных конденсаторов с заданным неравномерным охлаждением из *n* числа секций позволяет определить оптимальный размер дросселей для конкретного многосекционного конденсатора. В формулах (1)-(4) показаны основные расчетные величины методики.

$$\Delta P_{\text{тр}} = K' \frac{\rho w_0^2}{2} C_x \left[\left(\frac{w_1}{w_0} \right)^2 - 1 \right] \qquad (1)$$

$$\Delta P_{\text{др}} = L' \frac{\rho w_0^2}{2} \frac{x_1^2}{\left(\bar{n}_1 + \bar{n}_2 M\right)^2} \qquad (2)$$

$$K' = z\lambda \frac{l}{d_{\text{г}}} \qquad (3)$$

$$L' = \xi n_{\text{тр}}^2 \left(\frac{d_{\text{тр}}}{d_{\text{др}}}\right)^4 \qquad (4)$$

где $\Delta P_{\text{тр}}$ -потери давления в трубе конденсатора, Па; $\Delta P_{\text{др}}$ -потери давления на дросселе;n_1 – число секций с равномерным охлаждением; n_2 – число секций с неравномерным охлаждением; w_0 -скорость пара на входе в конденсатор; z -количество ходов $d_{\text{др}}$ -диаметр дросселя; x_1 -паросодержание на выходе из модуля при равномерном охлаждении; x_2 -паросодержание на выходе из модуля при неравномерном охлаждении; l - длина теплообменных труб; $d_{\text{вн}}$ -внутренний диаметр теплообменных труб; $\xi_{\text{др}}$ -сопротивление дросселя; $n_{\text{тр}}$ - количество теплообменных труб в модуле; λ -коэффициент трения (с учетом шероховатости).

Результаты, полученные при выполнении данной работы, вносят значительный вклад в понимание процессов работы конденсационных установок на переменных режимах и способах борьбы со снижением тепловой эффективности вследствие возникающей неравномерности охлаждения и локальных присосов воздуха.

Список литературы

1. Мильман О.О., Федоров В.А. Воздушно – конденсационные установки. – М.: Изд – во МЭИ, 2002. 208 с.
2. **Milman O.O., Kartuesova A.Yu., Yankov G.G., Ptakhin A.V., Krylov V.S., Korlyakova M.O.** Investigation of parallel operation of vacuum condenser sections with nonuniform cooling//Thermal Engineering, 2019, Vol. 66, No. 2, pp. 77–83.

A.Yu. Kartuesova, A.V. Ptakhin, V.S. Krylov

ZAO NPVP Turbocon, Kaluga, 248010 Russia

CALCULATED AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE VACUUM CONDENSER OPERATION UNDER NON-UNIFORM COOLING CONDITIONS

УДК 620.9

В.О. Милосердов[1], *М.О. Корлякова*[1]

[1] Московский государственный технический университет калужский филиал
Калуга, 248000, Баженова, 2

ПОСТРОЕНИЕ ПРЕДИКТИВНОЙ МОДЕЛИ ПАРОГЕНЕРАТОРА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА НА БАЗЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ЦИКЛА РЕНКИНА

В настоящее время генерация электрической энергии осуществляется с использованием паровых турбин, рабочим телом в которых является водяной пар. Однако для того, чтобы водяной пар стал рабочим телом он должен иметь высокую температуру, которая достигается только при высоких давлениях, что порождает свою цепочку проблем [1]. В качестве альтернативы пароводяному циклу Ренкина применяются установки на основе органического цикла Ренкина с использованием низкокипящих органических рабочих тел.

Однако поведение установок на органических телах значительно отличается от классического пароводяного цикла [2]. Кроме того, подводимый тепловой поток очень переменчив, так как определяется режимом работы основного оборудования. Все это требует разработки системы управления, которая сможет адаптироваться к значительным возмущениям и работать в условиях неопределенности относительно параметров объекта управления, что подразумевает включение в систему интеллектуальных регуляторов. Важным этапом является необходимость построения прогнозирующих моделей объектов управления.

Современные методы моделирования позволяют строить цифровые эквиваленты сложных технических систем на основе применения технологий обучения по примерам [3,4]. Это класс моделей, которые позволяют сформировать описание поведения объекта и предсказывать как он будет реагировать на определенные типы воздействий. Причем при построении модели адекватной сложности можно получить высокое качество предсказание не только в области, где проходило обучение, но и за ее пределами. Среди всех обучаемых моделей можно выделить нейросетевые системы, как вид алгоритмов с наиболее широким спектром возможностей [3].

Разработка методов формирования математических моделей комбинированной системы управления на базе интеграции оптимальных регуляторов и искусственных нейронных сетей будет достигнута благодаря проведению ряда экспериментов на реальном стендовом образце энергоустановки на базе ОЦР, а также выполнена проверка эффективности системы управления в условиях стендовой эксплуатации ОЦР-установки.

Список литературы

1. **P. J. Mago, L. M. Chamra, K. Srinivasan, C. Somayaji**, An examination of regenerative organic Rankine cycles using dry fluids, Applied Thermal Engineering 28 (2008) 998–1007
2. **B. Saleh, G. Koglbauer, M. Wendland, J. Fischer**, Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles, Energy 32 (2007) 1210–1221.
3. **Adil Rasheed , Omer San and Trond Kvamsdal**. Digital Twin: Values, Challenges and Enablers // URL: https://arxiv.org/pdf/1910.01719.pdf
4. **TG Ritto, FA Rochinha** Digital twin, physics-based model, and machine learning applied to damage detection in structures// URL: https://arxiv.org/pdf/2005.14360.pdf

V.O. Miloserdov [2], *M.O. Korlyakova* [2]

[1] Bauman Moscow State Technical University Kaluga branch,
Russia 248000 Kaluga, Bazhenova st.2

BUILDING A PREDICTIVE MODEL OF AN EXPERIMENTAL STAND STEAM GENERATOR BASED ON THE ORGANIC RANKINE CYCLE

УДК 533.6.011.6

А.В. Чукалин[1], *В.Н. Ковальногов*[1], *Р.В. Федоров*[1], *А.А. Бондаренко*[2]

[1] Ульяновский государственный технический университет,
Россия, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32
[2]Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева, 432071, г. Ульяновск, ул. Можайского, д. 8/8

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ И УСЛОВИЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Снижение объёмов энергоресурсов и их удорожание, масштабные экологические проблемы, ежегодное увеличение среднего уровня потребления энергии на душу населения, все эти проблемы требуют повышения производительности энергетических установок и их эффективности. Перспективным направлением является повышение эффективности работы газотурбинных двигателей (ГТД), эффективность и надёжность которых напрямую зависит от температуры рабочего тела. Усовершенствование тепловой защиты и повышение её эффективности является ключевым фактором, позволяющим увеличить производительность ГТД.

Одним из способов повышения эффективности тепловой защиты является комбинирование конвективно-пленочной защиты с пассивной тепловой защитой в виде демпфирующей поверхности (рис.1).

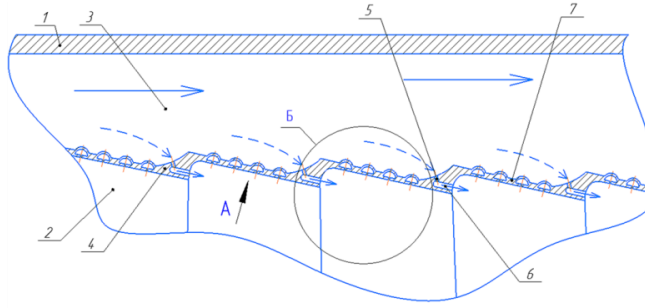


Рис. 1. Камера сгорания ГТД с демпфирующей поверхностью: 1 – корпус; 2 – жаровая труба; 3 – кольцевой канал; 4 – жаровая труба; 5 – дозирующие отверстия; 6 – пазы для подвода воздуха; 7 – демпфирующая поверхность.

Проводимые исследования и широкое практическое применение конвективно-плёночной защиты доказали эффективность и надёжность технологии [1]. Демпфирующая поверхность [2] представляет собой поверхность теплообмена, которая на внутренней стенке позволяет снизить теплообмен на поверхности, путём ламинаризации погранич-

ного слоя и затягивания охлаждающей воздушной пелены, а с другой повысить теплоотдачу поверхности за счёт увеличения площади охлаждения и турбулизации потока полусферическими выступами. Исследование эффективности воздействия демпфирующих полостей на пограничный слой было проведено на поверхности с полусферическими демпфирующими полостями [3]. Демпфирующие полости вызывают снижение турбулентного переноса на поверхности, тем самым снижая турбулентное трение и теплообмен в пограничном слое. Важной особенностью полусферической полости является возможность формирования полусферического выступа на внешней стенке. Полусферические выступы являются эффективным турбулизатором потока, при этом потери на трение являются относительно минимальными. Исследования показали, что применение данных технических устройств позволяет увеличить тепловой поток от стенки к охлаждающему воздуху до 20%.

Исследования выполнены при поддержке грантом Президента Российской Федерации по проекту НШ- 2493.2020.8.

Список литературы

1. **Jahnson P.** Modern Gas Turbine Systems / P. Jahnson. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2013. 816 p. DOI: 10.1533/9780857096067
2. Патент на полезную модель № 186044 Российская Федерация: Демпфирующая поверхность / В.Н. Ковальногов, Р.В. Федоров, Л.В. Хахалева, А.В. Чукалин. – Заяв. № 2018131418, 30.08.2018; опубл. 27.12.2018.
3. **Ковальногов В.Н., Федоров Р.В., Чукалин А.В., Бондаренко А.А., Мирошин А.Н.** Экспериментальное исследование пограничного слоя на перфорированной поверхности с демпфирующими полостями. // труды седьмой Российской национальной конференции по теплообмену. М. Издательство МЭИ, 2018. Т.2, с.373 – 376.

A.V. Chukalin[1]*, V.N. Kovalnogov*[1]*, R.V. Fedorov*[1]*, A.A. Bondarenko*[2]

[1]Ulyanovsk State Technical University
32 Severny Venets, Ulyanovsk, 432027, Russia
[2]Ulyanovsk Institute of Civil Aviation
named after Chief Marshal of Aviation B.P. Bugaev,
8/8 Mozhaisky str., Ulyanovsk, 432071, Russia

RESEARCH OF POSSIBILITIES AND CONDITIONS FOR INCREASING THE EFFICIENCY OF THERMAL PROTECTION OF A GAS TURBINE ENGINE

УДК 53.096

М.В. Малеваный[1], *Д.А Коновалов*[1]

[1] Воронежский государственный технический университет,
Воронеж, 394006, 20-летия Октября, 84

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА В РАЗНОТЕМПЕРАТУРНЫХ КОНДЕНСАЦИОННЫХ ФИЛЬТРАХ

В настоящее время в связи с активным развитием нефтегазовой отрасли достаточно остро стоит вопрос очистки природного газа от механических и химических примесей. Улавливание аэрозолей необходимо как для извлечения из них ценных веществ, так и для предотвращения загрязнения окружающей среды. Одним из наиболее простых является метод улавливания частиц в разнотемпературных фильтрах, которые доказали свою эффективность [1].

Принцип метода, на котором основан процесс очистки, заключается в следующем: загрязненный газовый поток подается в разнотемпературный канал прямоугольной формы, противоположные стенки которого имеют разную температуру. В данном канале происходит конденсация паров примеси на ядрах конденсации, например, механических частицах, газовых ионах и их рост до размеров капель. При такой организации температурного поля внутри рабочего канала фильтра на определенном расстоянии от входа формируется зона устойчивого пересыщения, которое позволяет производить глубокую очистку газов.

Исследования показали (рис.1), что эффективность очистки достигается при высоких расходах очищаемого газа, а режим работы устройства характеризуется наличием протяженных участков гидродинамической и тепловой стабилизации, где происходит зародышеобразование и конденсация капель жидкости.

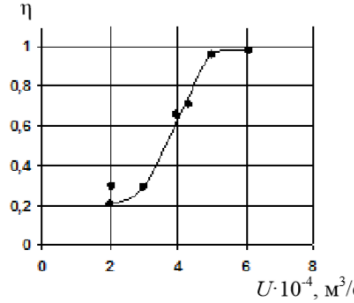


Рис. 1. Коэффициент улавливания жидкой аэрозольной фазы η в зависимости от расхода воздуха *U*

С увеличением объема очищаемого газа существенно возрастают массогабаритные характеристики устройства и могут наблюдаться такие негативные явления как:

- недостаточная скорость зародышеобразования и роста капель;
- малая степень влияния температурного поля внутри канала на очищаемый поток;
- унос образовавшихся капель из аппарата.

Таким образом, возникает задача интенсификации тепло- и массопереноса для создания компактных систем очистки.

Среди перспективных способов интенсификации тепло- и массообмена в таких системах является применение металлических пен, мембран [2], развитых поверхностей с анизотропными свойствами [3] и пр.

В настоящей работе проводится сравнительный анализ технических решений для интенсификации тепло- и массообмена в разнотемпературных аппаратах. Показано, что применение металлических пен с высокой степенью пористости, а также анизотропных пористых структур позволило существенно повысить эффективность очистки газа от аэрозольных примесей. В качестве перспективной предложена схема аппарата на основе термоэлектрических модулей.

Список литературы

1. **Ряжских В.И., Воронов Г.Г., Солженикин П.А., Стогней В.Г.** Совершенствование инженерной методики расчета разнотемпературного конденсационного фильтра // Вестник ВГТУ. 2014. Т.10. №1. с. 107-109.
2. **Ting Wang, En Lin, Yun-Lei Peng, Yao Chen, Peng Cheng, Zhenjie Zhang** Rational design and synthesis of ultramicroporous metal-organic frameworks for gas separation // Coordination Chemistry Reviews. Volume 423, 15 November 2020, Article 213485.
3. **Ryazhskih V.I., Keller A.V., Ryazhskih A.V., Nikolenko A.V., Dakhin, S.V.** Mathematical model of the acceleration laminar flow of a Newtonian fluid in an anisotropic porous channel of rectangular cross section / Bulletin of the South Ural State University, Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software, Volume 13, Issue 3, August 2020, pp. 17-28.

Работа выполнена в рамках конкурсной заявки 2021 г. РНФ по теме «Теоретико-экспериментальное обоснование применения анизотропных пористых сред и их адаптация для обеспечения интенсификации термических режимов энергонасыщенных поверхностей», №21-19-00519.

M.V. Malevany[1], *D.A Konovalov*[1]

[1] Voronezh State Technical University,
Voronezh, 394006, 20-letiya Oktyabrya, 84

MODERN APPROACHES TO THE INTENSIFICATION OF HEAT AND MASS TRANSFER IN DIFFERENT-TEMPERATURE CONDENSATION FILTERS

УДК 621.311.22, 621.175

А.В. Кондратьев[1,2,3], *В.С. Крылов*[1,2], *А.В. Птахин*[1,2,3], *А.П. Железнов*[1,3]

[1] ЗАО «Научно-производственное внедренческое предприятие «Турбокон», 248010, Калуга, Комсомольская Роща, 43

[2] Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского, 248023, Калуга, Степана Разина, 26

[3] Московскоий государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 248000, Калуга, Баженова, 2 (Калужский филиал)

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЯХ МОКРЫХ ВЕНТИЛЯТОРНЫХ ГРАДИРЕН

В настоящее время остро стоит вопрос охлаждающей воды для действующих и проектируемых электростанций: в мегаполисах стоимость водопользования увеличивается экспоненциально. Кроме того, постоянно ужесточаются экологические требования к действующим и вводимым электростанциям, касающиеся тепловых выбросов в водоёмы и выбросов влаги в атмосферу. В связи с этим, использование систем оборотного водоснабжения с мокрыми башенными градирнями открытого типа также оказывается нежелательным, поскольку их использование сопряжено с потерями циркводы, составляющими 2÷5% от её расхода. При этом, кратность охлаждения обычно составляет порядка m=50, то есть величина уноса влаги из башенных градирен сопоставима с расходом пара через паровую турбину.

Одним из решений данной проблемы является использование мокрых вентиляторных градирен. Такие установки обладают высокими коэффициентами теплопередачи за счёт того, что в них вода поступает через форсунки в ороситель, где непосредственно контактирует с охлаждающим воздухом. В последнее время эффективность мокрых вентиляторных градирен значительно возросла по сравнению с конструкциями, описанными в [1]. За счёт форсунок новой конструкции, обеспечивающих защиту от эффекта «зонтика» за счёт вращения разбрызгивателя, повышается равномерность орошения насадки; новые виды оросителей обеспечивают лучший контакт воды с охлаждающим воздухом; системы водоулавливания обеспечивают практически полное отсутствие уноса капельной влаги через диффузоры комплектных вентиляторов.

Поскольку опыт использования подобного оборудования в нашей стране мал, при эксплуатации подобных установок у персонала могут возникать вопросы касательно режимов их работы при различных температурах окружающего воздуха, и предпочтительных способов осуществления их регулирования.

Для подтверждения характеристик оборудования, заявленных производителем, требуется проведение обследований и промышленных испытаний данных установок, на основании результатов анализа которых даются рекомендации по режимам эксплуатации и доработке конструкции.

В отличие от СВГ и воздушных конденсаторов, для мокрых вентиляторных градирен особенно остро стоит вопрос о точности измерений влажности атмосферного воздуха во время испытаний, поскольку характеристики оборудования зависят от температуры воздуха по смоченному термометру и небольшая ошибка в измерении влажности воздуха приведёт к неверным выводам об эффективности установки.

При оценке эффективности работы мокрых вентиляторных градирен важно не только определить их фактические тепловые характеристики, но и при несоответствии их заявленным выявить причины этого.

Для этого требуется оценивать в том числе расход воздуха и мощность приводов вентиляторов. При сравнении полученных показателей с проектными необходимо приводить экспериментальные данные к проектным условиям с использованием специальной методики.

Список литературы

1. Клименко А. В., Зорин В. М. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника: справочник в 4-х книгах. Издание 3-е, переработанное и дополненное (Кн. 4) //Москва: МЭИ. – 2004.
2. ГОСТ 10921-90 Вентиляторы радиальные и осевые. Методы аэродинамических испытаний. - М., Издательство стандартов, 1991, 32 с.
3. Крюков Н.П. Аппараты воздушного охлаждения. – М.: Химия, 1983, 168 с.
4. **Федоров В.А., Мильман О.О., Ананьев П.А., Колесников Н.В., Дунаев С.Н., Птахин А.В., Кондратьев А.В.** Результаты экспериментальных исследований расходно-напорных характеристик вентилятора воздушного конденсатора паротурбинных установок. Вестник МЭИ, 2013. №2. С. 26-30.

A.V. Kondratev[1,2,3], *V.S. Krylov*[1,2], *A.V. Ptakhin*[1,2,3], *A.P. Zheleznov*[1,3]

[1] CJSC «Turbocon», Russia 248010 Kaluga, Komsomolskaya Roscha, 43
[2] Kaluga State university, named after K.E. Tsiolkovski,
Russia, 248023 Kaluga, Stepana Razina, 26
[3]Bauman Moscow State Technical University, Kaluga branch
Russia 248000 Kaluga, Bazhenova, 2

SPECIFIC MEASUREMENTS DURING INDUSTRIAL TESTS OF WET FAN COOLING TOWERS

УДК 536.521.2:662.6:681.518

В.А. Кузьмин[1], *А.Л. Адеков*[1], *И.А. Десятков*[2]

[1] Вятский Государственный Университет, 610000, Киров, ул Московская, 36
[2] АО ВяткаТорф, 610017, Киров, ул Маклина, 31

ПРОБЛЕМЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК МАЛОЙ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ В КИРОВСКОЙ ОБЛАСТИ

В настоящее время, с технологической точки зрения, малой энергетике не уделяется существенного внимания. Особенно это касается технологий, применяемых при изготовлении и обслуживании твердотопливных водогрейных котельных, в том числе работающих на местных видах топлива (щепа, дрова, торф, уголь). В среднем КПД таких котельных составляет 55-65 %, в некоторых случаях не более 40-50%, топливо расходуется неэффективно. Также имеют место повышенные выбросы парниковых газов (CO2, NOx).

Представлена систематизация информации об основных проблемах при эксплуатации котельных установках на объектах ЖКХ Кировской области. В качестве основных причин снижения эффективности работы котельных выявлены:

1. Отсутствие химводоподготовки на котельных.
2. Повышенное шлакование поверхностей нагрева котлов.
3. Отсутствие настройки тяго-дутьевых характеристик.
4. Внесение конструктивных изменений в котел без согласования с проектными организациями.

Определены основные причины снижения эффективности работы котлов на примере водогрейного котла КВр-2,0, который часто используется в системах централизованного и местного теплоснабжения.

Проведена оценка факторов снижения КПД котла КВр-2,0:

1. Расхолаживание топки из-за ручной загрузки топлива

После загрузки топлива в топливной смеси увеличивается концентрация CO (с 213 ppm до 6176 ppm), резко падает содержание O2 (с 13,2% до 5,9%) и увеличивается температуры дымовых газов (с 277,1 Cº до 588,8 Cº) [2].

2. Шлакование поверхностей нагрева котла.

На экранных поверхностях котла происходит образование конденсата. Происходит налипание летучей золы на теплосъёмные поверхности, образуется теплоизоляционный слой отложений толщиной порядка 3-5 мм. На рисунке 1 приведена термограмма поверхностей нагрева котла КВр-2,0 в момент загрузки топлива.

3. Низкое качество хранения и подготовки топлива к сжиганию.

Разработаны рекомендации по повышению эффективности работы котлов с помощью автоматизированных пирометрических комплексов, тепловизионному контролю и проведению режим-наладочных работ. Для этого проведено математическое моделирование характеристик излучения топочных газов с помощью разработанной программы СПЕКТР[1].

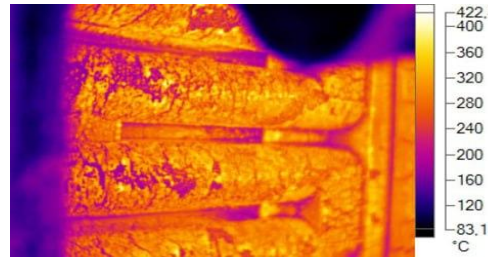


Рис 1. Термограмма поверхностей нагрева котла КВр-2,0

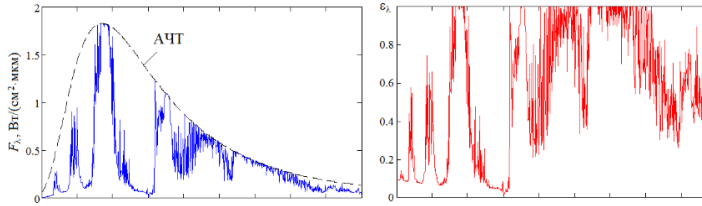


Рис 2. Характеристики излучения топочных газов для уставновки автоматизированного пирометрического комплекса

Список литературы

1. **Кузьмин В.А., Заграй И.А., Десятков И.А.** Определение плавкости золы торфа месторождений Кировской области // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2018. №11, 12. С.27–33.
2. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод / коллектив авторов; под ред. Н.В. Кузнецова и др. 2-е изд., перераб. М.: Эколит, 2011. 296 с.

V.A. Kuzmin [1], A.L. Adekov [1], I.A. Desyatkov [2]

[1] Vyatka State University, Russia, 61000 Kirov, Moskovskaya, 36
[2] JSC Vyatka Torf, Russia, 610000 Kirov, Maklina, 31

PROBLEMS OF EFFICIENCY OF BOILER PLANTS OF SMALL POWER ENGINEERING IN KIROV REGION

УДК 621.039

О.В. Митрофанова[1,2], *А.В. Федоринов*[2]

[1] Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
115409, Москва, Каширское ш., 31
[2] Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
123182 Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В СЛОЖНЫХ КАНАЛАХ ПАРОГЕНЕРИРУЮЩИХ СИСТЕМ СУДОВЫХ ЯЭУ

Решение проблем, связанных с интенсификацией теплообмена, играет немаловажную роль как в развитии транспортных ядерных энергетических установок (ЯЭУ), так и промышленных АЭС. Судовые ЯЭУ являются сложной взаимосвязанной системой, усовершенствование и обновление которой требует не только повышения теплогидравлических параметров и надежности эксплуатации установки, но также должного внимания к массогабаритным характеристикам и технико-экономическим показателям.

В настоящей работе рассмотрены особенности процессов теплообмена и гидродинамики в каналах сложной формы. Предложен новый вариант элементов трубной системы парогенератора судовой ЯЭУ, основой для которого является труба змеевикового типа, с дополнительной закруткой по своей оси (модель витого змеевикового канала). Как было показано в работе [1], механизмами, определяющими особенности поперечного перемешивания потока в пучках витых труб по сравнению с явлениями переноса в круглых трубах, являются усиленный конвективный перенос в масштабе профилированного поперечного сечения канала и организованный перенос в масштабе диаметра пучка, благодаря закрутке потока, генерируемой поверхностью витых труб.

Целью проводимого расчетного исследования является обоснование возможности повышения тепловой эффективности парогенерирующего блока судовой ЯЭУ. Моделирование процессов гидродинамики и теплообмена осуществлялось на экономайзерном участке с использованием универсального программного комплекса ANSYS CFX.

На первом этапе работы были построены геометрические модели змеевиковой трубы с круглым и овальным поперечным сечением (вариант витой трубы) в программном комплексе SOLIDWORKS. Расчетные модели труб показаны на рисунке 1 а,б.

Как показали результаты расчетов, при сравнении двух моделей второй вариант с использованием парогенерирующего канала витой

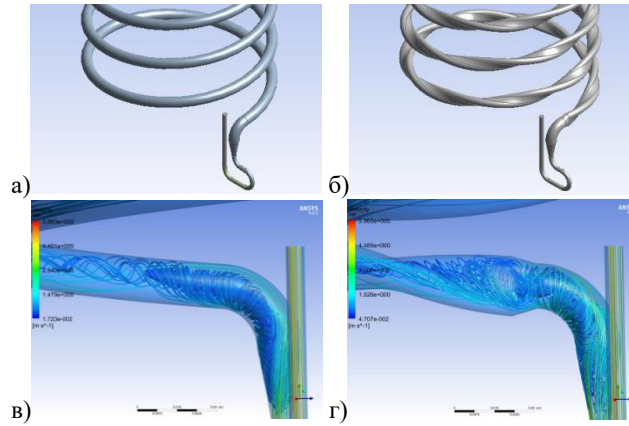


Рис. 1. Примеры расчетных моделей труб и результаты расчетов:
а) змеевик круглого сечения; б) змеевик овального сечения; в) поле скорости в зоне расширения канала круглого сечения (а); г) поле скорости в зоне расширения витого канала овального сечения (б)

геометрии имеет значительные преимущества в интенсификации теплообмена по сравнению с первым. При этом в зоне расширения канала, как показывают иллюстрации, представленные на рис. 1 в,г, наблюдается «смягчение» условий, приводящих к явлению кризиса закрученного потока, реализация которого наиболее вероятна в изогнутой расширяющейся части трубы круглого сечения.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований, грант № 19-08-00223 и Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ (Договор No. 02.a03.21.0005).

Список литературы

1. О возможности применения сборок витых труб в парогенерирующих системах транспортных ЯЭУ / О.В. Митрофанова, О.А. Ивлев, А.В. Федоринов. «Тепловые процессы в технике», 2018. Т.10. №5-6. С. 238–244

O.V. Mitrofanova[1,2], *A.V. Fedorinov*[2]

[1] National Research Nuclear University MEPhI, 115409,
Moscow, Kashirskoe sh., 31
[2] National Research Center "Kurchatov Institute", 123182,
Moscow, pl. Academician Kurchatov, 1

MODELING OF HYDRODYNAMICS AND HEAT TRANSFER IN COMPLEX CHANNELS OF STEAM GENERATING SYSTEMS OF SHIP NPP

УДК 621.9

С.С. Кропотова[1], *П.А. Стрижак*[1], *Н.Е. Шлегель*[1]

[1] Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, 634050, Ленина, 30 (•)

КОМБИНИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ ВТОРИЧНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТЕЙ

Вторичное измельчение капель жидкостей встречается в различных приложениях [1, 2]: для распыления топлива в топки котлов, в системах охлаждения, в двигателях внутреннего сгорания, в системах пожаротушения, в тепломассообменном оборудовании. Целью исследований являлось экспериментальное определение эффективных условий применения комбинированных систем для вторичного измельчения однородных и существенно неоднородных капель жидкостей. В качестве исследуемых жидкостных составов использовались составы, применяемые для практических газопарокапельных приложений (вода, ВУТ, ОВУТ, эмульсия трансформаторного масла, эмульсия дизеля. Для проведения исследований использовалась группа экспериментальных стендов, обеспечивающих последовательное дробление капель за счет столкновения друг с другом, при воздействии потока воздуха, за счет соударения с нагретой стенкой и микровзрыва капель (аналогично методике, рассмотренной в [3]).

Установлено, что при комбинировании нескольких схем измельчения (рис. 1) одиночных капель удалось добиться увеличения площади поверхности в несколько раз по сравнению со случаем, когда применялась лишь одна из схем измельчения. Показано, что при комбинировании четырех рассмотренных схем измельчения предоставляется возможным увеличить площадь поверхности жидкости практически в 263 раза. При этом существенный рост этой поверхности наблюдается на 3 стадии (когда измельченные ранее капли дробятся за счет столкновения о подложку). Наименее интенсивный рост площади поверхности характерен для применения четырёх вышеуказанных схем, но с дроблением капель на третьем этапе не о нагретую поверхность, а о холодную (увеличение площади в 182 раза). Видно, что наименьшему увеличению площади поверхности жидкости соответствует схема с комбинированным применением трех видов дробления капель: при столкновении капель друг с другом, при столкновении с нагретой твердой поверхностью и микро-взрывным распадом капель на третьем этапе. За счет совместного применения этих схем площадь поверхности жидкости после дробления увеличивается в 130 раз. Обобщая результаты,

(•) Н.Е. Шлегель, nik.shlegel.ask@gmail.com

изображенные на рис. 1, можно увидеть, что наиболее существенный вклад в комбинированных схемах вносит этап с дроблением капель о нагретую твердую поверхность после предварительного измельчения капель за счет столкновения капель между собой и дробления встречным потоком воздуха.

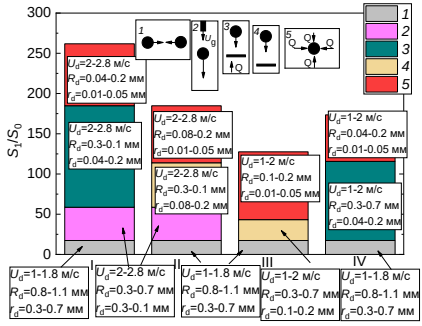


Рис. 1. Максимальные отношения площадей поверхности жидкости при комбинированном применении нескольких из четырех схем измельчения на примере одиночных капель: *1* – соударения между собой; *2* – взаимодействие с натекающим потоком воздуха в виде ударной волны; *3* – соударение с нагретой стенкой; *4* – соударение со стенкой без нагрева; *5* – микровзрывное измельчение, для дизельной эмульсии (90% дизельное топ-

По результатам экспериментальных исследований рекомендуется использовать схемы разрушения капель в следующей последовательности: дробление капель при их соударениях; воздействие на них потоком воздуха (импульсным в виде ударной волны); соударение с нагретой твердой поверхностью; микровзрывной распад капель при нагреве в соответствующих камерах и печах.

Работа поддержана Российским научным фондом (проект 18–71–10002).

Список литературы

1. **Arai M., Saito M.** Atomization characteristics of jet-to-jet and spray-to-spray impingement systems // At. Sprays. 1999. V. 9. P. 399–417.
2. **Guildenbecher D.R., López-Rivera C., Sojka P.E.** Secondary atomization // Exp. Fluids. 2009. V. 46, 371.
3. **Kuznetsov G.V., Shlegel N.E., Solomatin Y., Strizhak P.A.** Combined techniques of secondary atomization of multi-component droplets // Chemical Engineering Science. 2019. V. 209, 115199.

S.S. Kropotova, P.A. Strizhak, N.E. Shlegel

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

COMBINED SYSTEMS OF SECONDARY LIQUID ATOMIZATION

УДК 621.175

В.С. Крылов, А.Ю. Картуесова, А.В. Птахин

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

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО КОНДЕНСАТОРА ПАРА ИЗ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ

Неконденсирующиеся газы (НКГ) в составе парогазовой смеси (ПГС) – главная причина уменьшения коэффициента теплоотдачи при конденсации.

По мере конденсации неподвижного пара концентрация его $\nu_п$ по нормали к поверхности падает, а воздуха $\nu_в$ растет. Градиент концентрации пара вблизи поверхности уменьшается, и плотность потока пара в направлении к поверхности сокращается. Для увеличения потока необходимо уменьшить размеры области, занятой воздухом. Это может обеспечить динамическое воздействие движущейся парогазовой смеси: градиент концентрации $\nu_п$ возрастает, плотность потока пара увеличивается.

Для поддержания постоянной скорости пара на всем пути движения парогазовой смеси необходимо уменьшение площади поперечного сечения канала по мере конденсации пара из ПГС.

Существует оптимальная скорость ПГС, когда для заданного теплосъёма площадь поверхности канала конденсатора переменного сечения будет минимальной.

Для расчета тепломассообмена в таком канале необходимо получить экспериментальные данные по влиянию скорости ПГС и концентрации НКГ на интенсивность процесса конденсации. С этой целью был создан экспериментальный стенд. Результаты экспериментальных данных обобщены уравнением (1).

Рост скорости смеси интенсифицирует тепломассоперенос и одновременно увеличивает перепад давления на трубном пучке и, как следствие, уменьшает температуру насыщения пара t_s в ПГС. Снижению t_s способствует также рост концентрации НКГ по мере конденсации пара.

$$\frac{\alpha}{\alpha_{Nu}} = 28.3\Pi^{0.08} Nu_w^{-0.58} \left(1+245\Pi\right)^{0,33} e^{-11\nu\Pi^{0,35}-0,84} \qquad (1)$$

где $\Pi = \frac{\rho_п}{\rho_к}\frac{w^2}{gd}$ - модификационное число Фруда; $\rho_п, \rho_к$ – плотность пара и конденсата, w – скорость смеси, d - диаметр теплообменных труб

Это уравнение – база для созданной компьютерной программы расчета конденсатора ПГС.

Разработанная методика расчета конденсатора с ПГС позволяет определить оптимальную скорость пара при минимальной площади теплообменной поверхности. Выполненная серия расчетов показала зависимость оптимальной скорости от изменения следующих параметров: с ростом давления конденсации или объемной концентрации воздуха в паре значение оптимальной скорости уменьшается.

Рис. 1. Высокоэффективный конденсатор пара на стенде ОАО «КТЗ»

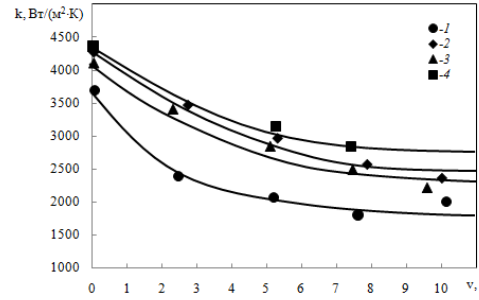


Рис. 2. Зависимость среднего коэффициент теплопередачи конденсатора от концентрации воздуха на входе при различных нагрузках
1 – при нагрузке 0,62 $q_{ном}$; 2 – 0,78 $q_{ном}$; 3 – $q_{ном}$; 4 – 1,33 $q_{ном}$

Результаты исследований реализованы в экспериментальном образце высокоэффективного конденсатора (рис 1). Получена зависимость среднего коэффициент теплопередачи конденсатора от концентрации воздуха на входе при различных нагрузках (рис.2).

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 17-19-01604).

Список литературы

1. **Мильман О.О., Никиточкин В.П.** Компоновка трубного пучка конденсатора пара, Теплоэнергетика, 1991, № 6, стр. 56-60.
2. High-Efficiency Condenser of Steam from a Steam – Gas Mixture O.O. Milman, V.S. Krylov, A.V. Ptakhin, A.V. Kondratev and G. G. Yankov Thermal Engineering, 2017, Vol. 64, № 12, pp. 874-883.

V.S. Krylov, A.Yu. Kartuesova, A.V. Ptakhin,
ZAO NPVP Turbocon, Kaluga, 248010 Russia

CALCULATED AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE HIGH-EFFICIENCY STEAM CONDENSER FROM A VAPOR-GAS MIXTURE

УДК 621.9

А.Н. Сухановский[1], *А.В. Евграфова*[1]

[1] Институт механики сплошных сред ПФИЦ УрО РАН,
Пермь, 614013, Ак. Королева, 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МНОГОМАСШТАБНОГО РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ НА ТЕПЛООБМЕН

В настоящее время проблема мониторинга состояния атмосферы крупных городов стоит очень остро. Рост количества промышленных предприятий, а нередко и неудачный выбор морфологии городской застройки приводит к нарушению естественной терморегуляции городского массива.

К сожалению, на сегодняшний день не существует единого подхода к описанию процессов тепломассообмена на масштабе мегаполиса. Двухмерные модели могут использоваться только в качестве первого приближения, так как течения в такой системе принципиально трехмерные. Существующие трехмерные модели с более подробной детализацией сильно ограничены по масштабам и требуют больших вычислительных ресурсов [1, 2]. При этом результаты трехмерного моделирования согласуются с данными натурных наблюдений только при сравнении средних характеристик. В свою очередь натурные эксперименты дают очень ограниченный набор данных и чаще всего используются только для верификации моделей [3, 4]. Разумной альтернативой используемым подходам может служить лабораторный эксперимент.

В рамках данного исследования реализован новый экспериментальный подход, который заключается в лабораторном моделировании влияния рельефа местности, в том числе искусственного происхождения на величину и пространственное распределение температуры. В качестве объекта исследований использована модель центрального района города Пермь. Модель создана из ABS пластика на 3D принтере Picaso. Модель качественно воспроизводит особенности рельефа местности, расположение и высоту зданий на территории 5 квадратных километра (масштаб печати 1:4000).

Проведена серия экспериментов по исследованию процесса остывания поверхности города после продолжительного нагревания инфракрасным излучением. Рассмотрены следующие ситуации: влияние плотности застройки на процесс остывания поверхности макета; влияние наличия рельефа искусственного происхождения на величину и интенсивность теплообмена. На рис. 1 представлены термограммы поверхности макета с наличием (а) и отсутствием (б) зданий после про-

должительного нагрева поверхности инфракрасным излучением, время остывания около получаса.

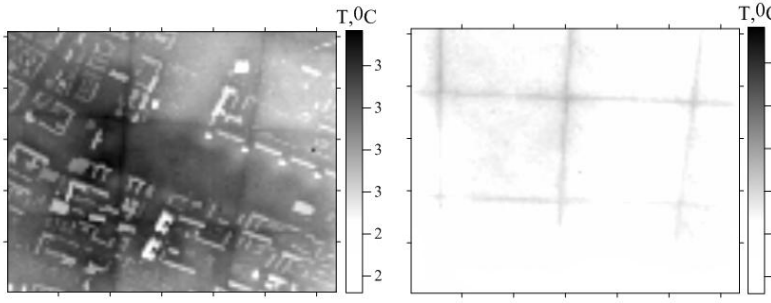


Рис. 1 Термограмма поверхности макета: а – модель с рельефом искусственного происхождения (здания); б – модель без домов. Время остывания около получаса.

Показано, что наличие зданий и увеличение плотности застройки существенно влияет на процесс остывания, что вероятно связано с изменением конвективной циркуляции и ухудшением вентиляции массива.

Работа выполнена при поддержке Правительства Пермского края (проект № С-26/788).

Список литературы

1. **Cybyk B., Boris J., Young T. Jn., Emery M., Cheatham S.** Simulation of fluid dynamics around complex urban geometries // 39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 2001. 803
2. **Boris J.** The threat of chemical and biological terrorism: preparing a response // Computing in Science & Engineering. 2002. 4(2). 22-32.
3. **Kastner-Klein P., Rotach M. W.** Mean flow and turbulence characteristics in an urban roughness sublayer //Boundary-Layer Meteorology. 2004. 111(1). 55-84..
4. **Klein P., Leitl B., Schatzmann M.** Driving physical mechanisms of flow and dispersion in urban canopies //International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society. 2007. 27(14). 1887-1907

A.N. Sukhanovskii [1], *A.V. Evgrafova*[1]

[1] Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS,
Russia, 614013, Perm, Academician Korolev Street, 1

INVESTIGATION OF SURFACE TOPOGRAPHY EFFECT ON HEAT TRANSFER

УДК 621.311.22

М.М. Замалеев[1], А.А. Яковлев[2], А.В. Абрамов[1], Р.В. Федоров[1], Д.Ф. Хусаинова[1]

[1]Ульяновский государственный технический университет,
г. Ульяновск, 432027, ул. Северный Венец, 32
[2]АО «Энергосбыт Плюс», г. Ульяновск, 432045, ул. Промышленная, д.5

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЭЦ ЗА СЧЕТ ВНЕДРЕНИЯ В ЕЕ ЦИКЛ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ

Повышение энергетической эффективности теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) всегда являлось первостепенной задачей для развития теплоэнергетической отрасли. Однако принципы функционирования оптового рынка электроэнергии и мощности, не учитывающие расстояние передачи электроэнергии от электростанции до потребителя, существенно осложняют возможности ТЭЦ конкурировать с другими источниками электроэнергии, такими как АЭС, ГЭС и ГРЭС. Происходит это в связи с тем, что, несмотря на расположение ТЭЦ в центре нагрузок, тарифы на электроэнергию включают в себя транспортную составляющую, сопоставимую со стоимостью производства электроэнергии. Вместе с этим происходит падение отпуска теплоты от ТЭЦ с горячей водой и технологическим паром, что приводит к сокращению выработки электроэнергии на тепловом потреблении и снижению тепловой экономичности.

Существующие теплофикационные системы, обеспечивающие централизованное теплоснабжение на базе ТЭЦ, в современных условиях становятся все менее привлекательными с точки зрения привлечения инвестиций для реновации генерирующего оборудования. Все чаще рассматриваются проекты реконструкции ТЭЦ с выводом из эксплуатации теплофикационных турбин и переводом тепловой нагрузки на водогрейные котлы.

По мнению авторов, повышение эффективности и инвестиционной привлекательности теплофикационных систем возможно за счет расширения функционала ТЭЦ [1-3]. Одним из направлений расширения функционала электростанции является использование ТЭЦ для переработки твердых коммунальных отходов (ТКО).

Основными преимуществами использования городских ТЭЦ с целью размещения оборудования для утилизации ТКО являются:

- наличие низкопотенциальных источников тепловой энергии пригодных для сушки ТБО с целью повышения калорийности отходов и качества утилизации;

- возможность повышения экономичности ТЭЦ за счет частичного замещения отходами основного вида топлива, а также за счет реализации на рынке продуктов переработки пластика и резины;

- значительное снижение транспортных расходов на перевозку ТКО в связи с нахождением ТЭЦ в черте города;

- снижение капитальных затрат на строительство мусоросжигательного завода за счет использования существующей инфраструктуры ТЭЦ;

- возможность термического разложения ядовитых газов в паровых котлах ТЭЦ;

- повышение конкурентоспособности ТЭЦ за счет расширения функционала их использования.

Таким образом, расширение функционала ТЭЦ за счет внедрения в её цикл оборудования для переработки отходов позволяет максимально эффективно использовать существующую инфраструктуру тепловой электрической станции и повысить ее энергетическую эффективность.

Исследования выполнены при финансовой поддержке грантом Президента Российской Федерации по проекту НШ-2493.2020.8.

Список литературы

1. **Замалеев, М.М.** Проблема утилизации снега в крупных городах / М.М. Замалеев, И.В. Губин, В.И. Шарапов // Сб. науч. трудов науч.-исслед. лаборатории «Теплоэнергетические системы и установки» УлГТУ «Теплоэнергетика и теплоснабжение». Выпуск 11. – Ульяновск: ГОУ ВПО «Ульян. гос. техн. ун-т», 2015. – С. 141-152.
2. **Замалеев, М.М.** Энергоэффективные решения совместного использования городской инфраструктуры централизованного тепло- и водоснабжения / М.М. Замалеев, В.И. Шарапов, И.В. Губин и др. // Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности: Седьмая Международная научно-техническая конференция (г. Ульяновск, 21-22 апреля 2017 г.): сборник научных трудов. Т. 1. – Ульяновск: УлГТУ, 2017. – 329 с. С. 122-127.
3. **Замалеев, М.М.** Использование энергетического потенциала ТЭЦ для нужд коммунального хозяйства / М.М. Замалеев, В.И. Шарапов, И.В. Губин, В.А. Павлов // Труды Академэнерго. – 2016. – №2. – С. 25-38.

M.M. Zamaleev[1], A.A. Yakovlev[2], A.V. Abramov[1], R.V. Fedorov[1], D.F. Khusainova[1]

[1]Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk,
32 Severny Venets, Ulyanovsk, 432027, Russia
[2]Energy sales T Plus, 5Industrial st., Ulyanovsk, 432045, Russia

INCREASING THE EFFICIENCY OF COGENERATION THERMAL POWER PLANT BY INTRODUCING WASTE PROCESSING EQUIPMENT INTO ITS CYCLE

УДК 533.601: 536.244

М.И. Коноплев, Д.А. Онохин, С.В. Карпов

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

АЭРОДИНАМИКА И КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В ЦИКЛОННЫХ РЕЦИРКУЛЯЦИОННЫХ УСТРОЙСТВАХ

Управление аэродинамикой циклонного потока в нагревательных печах, циклонных топках, сушилках и других устройствах с закрученным движением газов [1] осуществляется как за счет изменения их основных безразмерных геометрических и режимных характеристик: суммарной площади входа потока $\bar{f}_{вх} = 4f_{вх}/(\pi D_к^2)$, где $D_к$ – внутренний диаметр циклонной камеры; диаметра выходного отверстия $\bar{d}_{вых} = d_{вых}/ D_к$; длины рабочего объема $\bar{L}_к = L_к/D_к$; входного числа Рейнольдса $Re_{вх} = v_{вх}D_к/\nu_{вх}$, где $v_{вх}$, $\nu_{вх}$ – средние значения скорости и кинематического коэффициента вязкости газа во входных каналах), так и за счет организации внешней рециркуляции газов с коэффициентом по расходу $k_р = Q_{рец}/Q_{вх}$.

Авторами [2] предложено использовать новый принцип организации внешней рециркуляции, при котором транспортировка теплоносителя с боковой поверхности циклонного устройства, где температура его наиболее высокая, в приосевую область осуществляется за счет перепада давления в пристенной и приосевой зонах закрученного потока – радиального градиента давления. Как известно [3], этот перепад может достигать больших величин, что должно обеспечить достаточно высокую кратность внешней рециркуляции газов. Преимуществом его является также возможность регулирования аэродинамики циклонного потока в широких пределах без изменения основных конструктивных параметров циклонной камеры.

Исследование аэродинамики циклонного рециркуляционного устройства было выполнено на модели горизонтальной циклонной камеры внутренним диаметром $D_к$ = 201 мм и длиной $L_к$ = 316 мм. Подвод воздуха осуществлялся тангенциально к внутренней поверхности камеры с двух диаметрально противоположных сторон через каналы с высотой $h_{вх}$ = 24 мм и длиной (размер по образующей) $l_{вх}$ = 25,7 мм. Безразмерная суммарная площадь входа потока $\bar{f}_{вх}$ равнялась $3{,}9\cdot10^{-2}$. Отвод воздуха из циклонной камеры производился через пережим выходного торца, безразмерный диаметр которого $\bar{d}_{вых}$ мог принимать значения от 0,2 до 0,4. отбор рециркулируемого газа $Q_{рец}$ – через одно или несколько радиальных патрубков на боковой поверхности рабочего объема с $\bar{f}_{рец}$ от 0 до $7{,}2\cdot10^{-2}$ и соединительные каналы с приосевой зоной камеры.

Из анализа профилей аксиальной скорости w_z сделан вывод: при использовании внешней рециркуляции ликвидируется осевой обратный ток и формируется прямое приосевое течение, величина максимальной скорости в котором зависит от $\bar{d}_{вых}$ и достигает значений, соизмеримых с входной, а при $\bar{d}_{вых}$=0.2 превышает v_x на 20%.Аналитическое распределение тангенциальной скорости w_φ [2] найдено совместным решением уравнений движения и сплошности; в качестве критерия использовано радиальное турбулентное число Рейнольдса $\left|\mathrm{Re}_r\right| = 3,7\left((f_{вх} / f_{вых})(1-k_р)\right)^{0,5}$.

Численное моделирование аэродинамики выполнено на платформе OpenFoam с помощью модели турбулентности Лаундера-Гибсона (GL), схем дискретизации дифференциальных уравнений второго порядка точности и нестационарного алгоритма решения. Максимальное расхождение расчетных и экспериментальных величин w_φ не превышает 6…10 %. Решение тепловой задачи на боковой поверхности циклонного устройства и обобщение опытных данных по конвективному теплообмену выполнено полуэмпирическим методом, основанным на использовании интегрального соотношения для теплового пограничного слоя.

Предложены уравнения подобия, хорошо согласующиеся с имеющимися экспериментальными данными авторов и других исследователей по теплоотдаче гладкостенных циклонных камер, сепараторов – теплоуловителей и теплообменников. Аналитически установлен закон изменения числа Нуссельта на стенке камеры с ростом массовой концентрации взвеси в двухфазовых условиях течения.

Список литературы

1. **Карпов, С.В.** Аэродинамические и теплообменные процессы в циклонных камерах с внешней рециркуляцией гаэов/С.В. Карпов, А.А. Загоскин, Коноплев М.И., Онохин Д.А.// III Междунар. конф. «Современные проблемы теплофизики и энергетики» Россия, М., 19-23 окт. 2020. Мат-лы конф. М.: ИД МЭИ, С.122-124.
2. **Загоскин, А.А.** О численном моделировании аэродинамики циклонных устройств / А.А. Загоскин, С.В. Карпов, Э.Н. Сабуров // Вестник ЧГУ. 2014. № 1(54). С. 13–18.
3. **Сабуров, Э.Н.** Циклонные устройства в деревообрабатывающем и целлюлозно-бумажном производстве /Э.Н. Сабуров, С.В. Карпов. М.: Экология, 1993. 368 с.

M.I. Konoplev, D.A. Onokhin, S.V. Karpov

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

AERODYNAMICS AND CONVECTIVE HEAT TRANSFER IN RECIRCULATING CYCLONE UNITS

УДК 621.311.22, 621.175

А.В. Птахин[1,2,3], *О.О. Мильман*[1,2,3]

[1] ЗАО «Научно-производственное внедренческое предприятие «Турбокон», 248010, Калуга, Комсомольская Роща, 43
[2] Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского, 248023, Калуга, Степана Разина, 26
[3] Московскоий государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 248000, Калуга, Баженова, 2 (Калужский филиал)

ПЕРЕМЕННЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ВОЗДУШНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ - КОРРЕКТИРОВКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА

Воздушно-конденсационные установки находят все более широкое применение в энергетике на фоне роста стоимости и дефицита охлаждающей воды и ужесточения экологических требований. Энергетические компании заинтересованы в снижении потребления воды в технических целях, снижении техногенных выбросов в окружающую среду. Технологии отвода тепла с помощью воздушных конденсаторов (ВК) создают возможность строительства электростанций в районах с отсутствием воды для промышленных нужд, а также мегаполисах, где использование воды на технические нужды ограничено. В связи с этим анализ работы ВКУ, разработка методов, повышающих достоверность определения их характеристик, в частности, переменных режимов работы – актуальная научно-техническая задача.

Ввиду принципиального конструктивного отличия методы расчета номинального и переменных режимов, описанные в [1] для водоохлаждаемых поверхностных конденсаторов, не применимы к ВКУ. Методика расчета переменных режимов, описанная в [2, 1], не связана со способом отвода тепла, так как опирается на две базовые точки: давление P_p и температура пара t_{sp} в расчетной точке (при номинальной нагрузке Q_p, расходе и температуре охлаждающей среды t_{cp}) и при отсутствии нагрузки, т.е. при минимальном давлении P_0, создаваемом газоудаляющим устройством, и соответствующей этому давлению температуре насыщения t_{s0}.

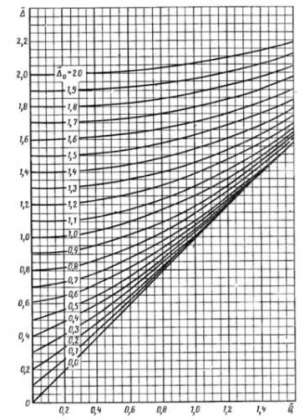


Рис. 1. Номограмма к расчёту переменных режимов [1].

В соответствии с [1] расчет ведется с использованием номограммы на Рисунке 1, где на оси абсцисс отложена величина относительной тепловой нагрузки, а по оси ординат – относительное значение располагаемой разности температур.

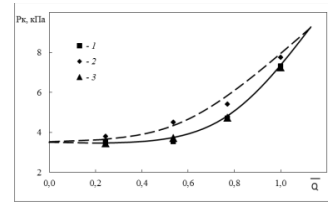


Рис. 2. Сопоставление экспериментальных и расчётных данных переменных режимов, где: 1 – эксперимент; 2 – расчёт по методике [1], 3 - расчет по формуле 1.

На Рисунке 2 приведены характеристики натурной секции ВКУ при изменении тепловой нагрузки при различных расходах воздуха от 1,3 до 7,7 кг/с. Данные экспериментальных измерений на 0.5÷1кПа ниже расчетных, что можно признать вполне удовлетворительным. Из рассмотренных результатов расчета и при сопоставлении их с экспериментом следует, что в области нагрузок (0,2-0,8) Q_p имеет место превышение расчетной величины давления над действительным, полученным в результате эксперимента.

Эти условия удовлетворяет функция для расчета поправок к $\bar{\Delta}$ следующего вида: $\delta\bar{\Delta} = A \cdot \bar{\Delta}_0 \cdot \bar{Q} \cdot (1-\bar{Q}) \cdot (2-\bar{\Delta}_0)$. Величина коэффициента А на основе анализа результатов эксперимента определена равной А=0,3, и поправка в целом имеет вид:

$$\delta\bar{\Delta} = 0,3 \cdot \bar{\Delta}_0 \cdot \bar{Q} \cdot (1-\bar{Q}) \cdot (2-\bar{\Delta}_0) \qquad (1)$$

Расчет с использованием поправок, учитывающих влияние температуры охлаждающего воздуха, изменений тепловой нагрузки, присосов воздуха и характеристик воздухоудаляющих устройств, даёт удовлетворительные результаты.

Список литературы

1. Шкловер Г.Г, Мильман О.О. Исследование и расчет конденсационных установок паровых турбин. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 240 с..
2. Мильман О.О., Федоров В.А. Воздушно-конденсационные установки. – М. Из-во МЭИ, 2003. – 208 с.

A.V. Ptakhin[1,2,3], *O.O. Milman*[1,2,3]

[1] CJSC «Turbocon»
Russia 248010 Kaluga, Komsomolskaya Roscha, 43
[2] Kaluga State university, named after K.E. Tsiolkovski,
Russia, 248023 Kaluga, Stepana Razina, 26
[3]Bauman Moscow State Technical University, Kaluga branch
Russia 248000 Kaluga, Bazhenova, 2

VARIABLE OPERATING MODES OF AIR CONDENSERS - CORRECTION OF THE CALCULATION PROCEDURE

УДК 621.039.6.536.24

Д.Ю. Черныш, Л.В. Ямщикова, И.А. Беляев

Объединенный институт высоких температур РАН,
125412, Москва, Ижорская, 13 стр. 2 (•)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСТРОЙСТВ ЗАКРУТКИ НА ПОТОК ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Использование жидкометаллических систем ядерных и перспективных термоядерных установок является актуальным направлением энергетики будущего. Применение жидких металлов (ЖМ) в теплообменных каналах термоядерных установок сопряжено с воздействием на них сильных магнитных полей (МП). В ходе проведенных экспериментов в исследованных конфигурациях обнаружено возникновение низкочастотных температурных пульсаций, существующих в широком диапазоне значений величины МП, приводящих к термокачке и, как следствие, разрушению теплообменных трактов [1]. Настоящее исследование направлено на анализ различных способов воздействия на поток ЖМ с целью «разрушения» вихревых структур, приводящих к образованию описанных неблагоприятных эффектов.

Проведено экспериментальное исследование влияния устройств закрутки потока ЖМ в МП. Исследовалась следующая конфигурация: опускное течение ртути (модельная жидкость) в канале прямоугольного сечения, оснащенном нагревателями на его широких сторонах и расположенного внутри электромагнита [2]. Исследования проводились с применением «закрутчиков» потока различного типа: тонкий поперечный стержень (№1), толстый поперечный стержень (№2), цилиндрическая вставка (№3), наклонные стержни (четыре стержня под углом 45°; «закрутчик» №4). Рассматривались режимы течения в диапазоне Re=(2,5-7,5)×10^3 как при симметричном двустороннем обогреве, так и с односторонним обогревом (при этом значение тепловой нагрузки было неизменно для всех конфигураций; Gr=1,25×10^8) в широком диапазоне воздействующего поперечного МП (Ha=0-380). Эксперименты проводились на стенде РК-3 [3], с применением зондовой методики [4] измерены поля осредненной и пульсационной температуры.

В ходе проведенного анализа выявлены как режимы, в которых наличие устройств закрутки потока не привело к значительным изменениям рассматриваемых характеристик, так и режимы, в которых отмечается влияние «закрутчиков» в части уменьшения области существования температурных пульсаций (Рис. 1).

(•) Д.Ю. Черныш, ChernyshDY@gmail.com

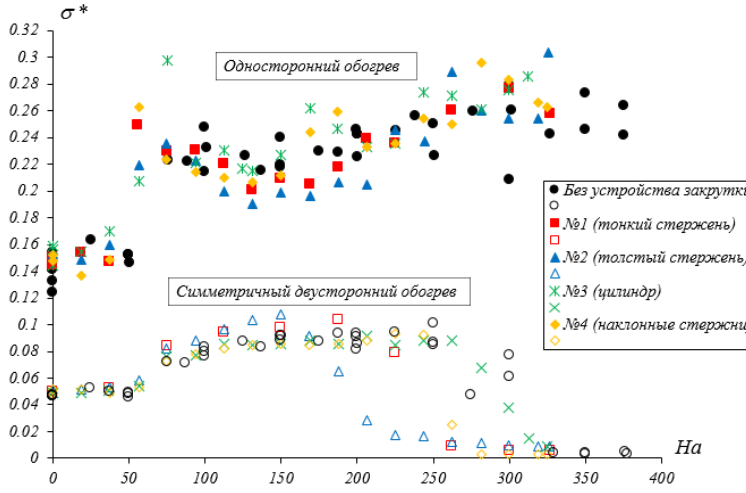


Рис. 1. Зависимость безразмерной интенсивности температурных пульсаций (σ*) от величина магнитного поля (числа *Ha*) для режима:Re=5×10^3 (течение опускное), Gr=$1{,}25\times10^8$; данные представлены для одинаковой точке в ядре потока

Список литературы

1. **I. A. Belyaev, I. I. Poddubnyi, N. G. Razuvanov, and V. G. Sviridov**, "Evaluation of temperature fluctuations influence on the structure of tokamak-reactor liquid metal blanket module" Probl. At. Sci. Technol., Ser.: Thermonucl. Fusion 41, 41 (2018).
2. **Беляев И. А. и др.** Экспериментальный стенд для исследований теплообмена перспективных теплоносителей ядерной энергетики //Теплоэнергетика. – 2017. – №. 11. – С. 66-74.
3. **Belyaev I. et al.** Effects of symmetry on magnetohydrodynamic mixed convection flow in a vertical duct //Physics of Fluids. – 2020. – Т. 32. – №. 9. – С. 094106.
4. **Беляев И. А. и др.** Техника сканирующих зондовых измерений полей температуры в потоке жидкости //Теплоэнергетика. – 2019. – №. 6. – С. 5-16.

D.Yu. Chernysh, L.V. Yamshchikova, I.A. Belyaev

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences,
Russia 125412 Moscow, Izhorskaya, 13/2

EXPERIMENTAL STUDY OF THE INFLUENCE OF SWIRLING DEVICES ON THE FLOW OF LIQUID METAL IN A MAGNETIC FIELD

УДК 621.45.022.7

К.Р. Носкова, А.И. Гурьянов, М.М. Гурьянова

ФГБОУ ВО Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьёва, 152934, Рыбинск, Пушкина ул., 53

ГАЗОДИНАМИКА КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГТД В УСЛОВИЯХ НЕСИММЕТРИЧНОГО ТЕЧЕНИЯ НА ВХОДЕ

Известно, что нестационарность процессов, остаточная закрутка течения в компрессоре ГТД может являться причиной формирования несимметричной эпюры по высоте канала во входном сечении диффузора камеры сгорания (КС), которая в свою очередь приводит к увеличению гидравлических потерь [1, 2]. В малоэмиссионных современных КС, работающих по схеме горения LP (Lean Premixed) с предварительно перемешанной топливовоздушной смесью в горелочных модулях, существуют тенденция к уменьшению или полному отсутствию поясов охлаждающих и основных отверстий для избегания переохлажденных областей у стенок жаровой трубы (ЖТ). В таком случае 100% расхода воздуха может подаваться через фронтовое устройство.

Для создания несимметричной эпюры скорости на входе в преддиффузор спроектированы проточные области генераторов, оценка осуществляется с помощью коэффициента несимметричности К, который определяется как отношение среднерасходной скорости потока в верхнем полуканале к скорости в нижнем.

Проведены численные исследования на секторной модели камеры сгорания в стационарной и нестационарной трехмерной постановке при совместном влиянии входной несимметричности течения и при последовательном закрытии поясов охлаждающих и основных отверстий, то есть при перераспределении расхода воздуха через фронтовое устройство.

Расчеты показали, что увеличение относительной доли площади закрываемых основных отверстий в зоне горения и смешения, а также охлаждающих отверстий сопровождается изменением коэффициента гидравлических потерь во всех основных элементах КС. Минимальная величина имеет место при полностью открытых поясах отверстий. При закрытии первого и последующих поясов коэффициент гидравлических потерь увеличивается, но качественной перестройки структуры потока не происходит, так как она определяется начальным коэффициентом несимметричности, при этом в объеме ЖТ происходят локальные изменения структуры течения в области ввода охлаждающих струй в ЖТ.

Для верификации численного моделирования выполнены опытные исследования на модели проточной части КС с использованием системы подкрашенных струй и ламинарного течения в гидравлическом лотке. Выяснено, что при К=1 на входе в диффузор равномерное распределе-

ние линий тока, также достаточно равномерно затекание рабочего тела во фронтовое устройство. При искажении профиля скорости на выходе из генераторов несимметричности наблюдается смещение потока в наружный (K>1) или внутренний (K<1) кольцевые каналы. Это приводит к уменьшению эффективности охлаждения жаровой трубы, равномерности распределения воздуха во фронтовом устройстве, снижается качество перемешивания топливовоздушной смеси, на выходе из ЖТ формируется неравномерное распределение линий тока, а это может отрицательно сказаться на работе турбины.

Расчетно-экспериментальные исследования, описанные выше, выполнены в стационарной постановке при турбулентном (расчетном) режиме течения, а эксперименты по визуализации структуры течения в КС в гидролотке проведены на опытной модели в виде прямоугольной развертки сектора камеры при ламинарном режиме течения, так как при турбулентном режиме на данной установке организовать течение не представлялось возможным. Поэтому численно смоделирована газодинамика в КС с учетом несимметричности входного профиля скорости в нестационарной постановке при ламинарном режиме течения. Полученные результаты верифицированы визуализацией газодинамики КС при режиме, соответствующему расчетному на экспериментальной модели, подготовленной для проведения исследований с помощью метода PIV.

Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение фундаментальных научных исследований на 2020 год и плановый период 2021 и 2022 годов (шифр научной темы 0774-2020-0004).

Список литературы

1. **Gur'yanova, M. M.** Joint effect of input asymmetrical velocity profile and initial turbulence intensity on hydraulics of a separated diffuser of GTE combustion chamber / M. M. Gur'yanova, Sh. A. Piralishvili // Russian Aeronautics (Iz.VUZ). – 2016. – Vol. 59. – №2. – Pp. 197–205.
2. **Гурьянова, М. М.** Расчётно-экспериментальное исследование газодинамики камеры сгорания ГТД / М. М. Гурьянова, К. Р. Тимофеева, А. И. Гурьянов // Вестник РГАТУ имени П. А. Соловьева. – №4 (51). – 2019. С. 32-40.

K.R. Noskova, A.I. Gur'yanov, M.M. Gur'yanova

Soloviev Rybinsk State Aviation Technical University,
Russia, Rybinsk, Pushkina, 53

GAS DYNAMICS OF THE COMBUSTION CHAMBER OF A GTE UNDER THE CONDITIONS OF THE INPUT UNYMMETRIC FLOW

Д.А. Виноградов[1], *А.И. Исмаилов*[1,2]

[1]Объединенный институт высоких температур РАН,
Ижорская ул., 13, стр.2, Москва, Россия, 125412 (•)
[2] Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Красноказарменная ул., 14, Москва, Россия, 111250 (•)

О ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЯХ ПАРОВОГО ВЗРЫВА И ТОНКОЙ ФРАГМЕНТАЦИИ РАСПЛАВА

Паровой взрыв (ПВ), как явление, активно изучается с 60-х годов прошлого века, но фундаментальные причины и особенности протекания недостаточно изучены для эффективного применения в инженерных целях. Механизм, предшествующий паровому взрыву, а именно, тонка фрагментация капли расплава в низкокипящей жидкости – есть открытый дискуссионный вопрос на сегодняшний день. В данном докладе рассмотрены шесть наиболее актуальных на сегодняшний день моделей фрагментации.

Следует отметить, что в процессе фрагментации основополагающую роль играет кризис пленочного кипения. Поэтому были проведены два типа экспериментов. В одном металлический образец нагревался в индукционной печи в состоянии левитации, затем, при отключении питание установки, он падал в резервуар с водой и фрагментировал. Во втором типе опытов непосредственно исследовался коллапс паровой пленки на поверхности металлической сферы. Металлический образец нагревался в индукционной печи в пустом резервуаре, затем этот резервуар заполнялся водой. В эксперименте велась видеосъемка и измерялись температура металлического образца и воды, а также импульс давления, спровоцированный сходом паровой пленки.

Проводя аналитические оценки возможной скорости охлаждения образцов в эксперименте с фрагментацией, было установлено, что она может достигать порядков 10^4 -10^{10} К/с. Такие скорости охлаждения достигаются технологиях получения аморфных металлов (АМ) методом закалки из жидкого состояния [1]. АМ обладают уникальными физико-химическими (механическими, магнитными, электрическими, коррозионными, абсорбционными и др.) свойствами. Также проявляют способность поглощать водород, что делает их перспективными в использовании в водородной энергетике. В опыте с фрагментацией, полученные осколки далее дробились в механической дробилке для достижения нужных характерных размеров для рентгеноструктурного

(•) А.М. Исмаилов, mailto:ismailovclitmaster@gmail.com

анализа. Чтобы исключить вклад механического воздействия на формирования аморфной структуры у фрагментов, проводился дополнительный эксперимент, где без фрагментации в жидкости, образцы дробились в дробилке.

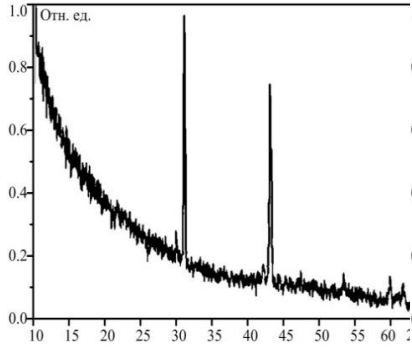


Рис. 1. Дифрактометрия фрагментов олова с ПВ

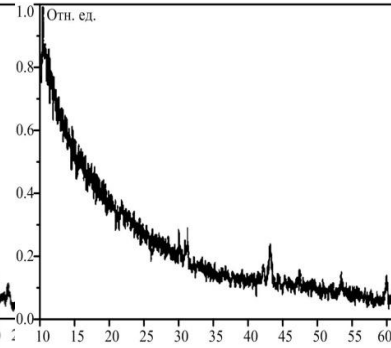


Рис. 2. Дифрактометрия фрагментов олова без ПВ

Данное обстоятельство подтверждает возможность получения АМ с помощью тонкой фрагментации и ПВ. Помимо получения АМ, отмечается, что ПВ может быть использован при производстве крафт-целюллозы [2].

Авторы выражают благодарность сотрудникам ОИВТ РАН. Ю. П. Ивочкину и И.О. Теплякову за помощь в проведении исследований.

Список литературы

1. Судзуки К., Фудзимори Х., Хасимото К. Аморфные металлы. – М.: Металлургия, 1987.
2. **Eric Jin, Markus Bussmann, Honghi Tran** An experimental study of smelt-water interaction in the recovery boiler dissolving tank.// Tappi Journal June 2015 Vol. 14 No. 6, p 385-393

D.A. Vinogradov [1], A.M. Ismailov [1,2]

[1]Joint Institute of High Temperature,
Russia, 125412 Moscow, Izhorskaya, 13 Blgd 2
[2]National research institute «MPEI» ,
Russia, 111250 Moscow, Krasnokazarmennaya, 14

ON TECHNOLOGICAL APPLICATIONS OF STEAM EXPLOSION AND FINE MELT FRAGMENTATION

УДК 533.6.011.6; 536.37; 53.092

К.Е. Веселов[1], *Ш.А. Пиралишвили*[1], *С.В. Веретенников*[1]

[1] Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П. А. Соловьёва, Рыбинск, 152934, ул. Пушкина, д.53

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИИ ЗАКРУЧИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ НА ЭФФЕКТ ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЯ В ВИХРЕВОЙ ТРУБЕ

Вихревой эффект – явление температурного разделения потока, обладающего избыточным давлением, при создании условий для интенсивной закрутки течения. Наблюдается обширное применение эффекта Ранка-Хилша в различных отраслях энергетики и не только: вихревые охладители и холодильные камеры, дроссельные холодильные установки, вихревые термостаты, индивидуальные средства кондиционирования защитного снаряжения и т.д. [1] - основным устройством для технической реализации которого является вихревая труба.

Суть вихревого эффекта состоит в том, что, подавая сжатый газ внутрь особым образом сконструированной трубы и интенсивно закручивая поток, происходит его разделение на 2 части: по периферии движется свободный подогретый вихрь, а у оси охлажденный вынужденный. Последний движется в противоположном вдоль оси направлении – к области подачи газа - поэтому выводится такой поток через отверстие в диафрагме в сечении закручивающего устройства.

Одним из главных направлении в изучении вихревых энергоразделителей является повышение их эффективности путем оптимизации геометрии вихревых труб [1]: в работе [2] применялись методы численного моделирования для определения влияния формы поперечного сечения и профилирования закручивающего устройства на эффект энергоразделения.

Существуют противоречивые результаты влияния геометрии вихревой трубы на вихревой эффект, что определяет необходимость в дальнейшем исследовании влияния геометрии.

В настоящей работе за основу принята цилиндрическая вихревая труба без дополнительного потока диаметром 20 мм; общей длиной камеры энергоразделения с раскручивающим устройством в виде крестовины - 10,5 калибров; площадь соплового сечения во всех случаях определялась из условия $\overline{F_c}$ =0,1; для отвода охлажденных газов в диафрагме выполнено отверстие d=10мм. Были исследованы закручивающие устройства тангенциального типа, спрофилированные по спирали Архимеда, а также спрофилированные по лемнискате Бернулли, состоящие из 1, 2, 3 и 4 сопловых подводов (12 геометрий).

В работе сопоставлены результаты численных расчетов: полученных на разных моделях турбулентности, различных типах сеток с эквивалентными по масштабу ячейками; выполненных на различных формах закручивающих устройств. Рассмотрены режимы работы по относительной доле охлажденного потока: μ=0,5; μ=0,68 в интервале степени сжатия газа $\pi \in [1{,}15; 4{,}5]$.

В результате получена однозначность роста эффективности энергоразделения, характеризуемого термическим КПД ($\eta_т$), с ростом числа подводов для всех видов закручивающих устройств.

На малых π для четного числа тангенциальных подводов функции, характеризующие эффективность охлаждения устройства являются убывающими, а для нечетного числа – возрастающими; наблюдается прирост функций η_t и адиабатного КПД (φ) в пределах 2% в случае 2, 4 тангенциальных подводов в интервале степени расширения $\pi^* \in [2..4]$. Профилирование уменьшает влияние числа подводов на эффект энергоразделения: наименьшее влияние наблюдается при использовании спирали Архимеда в качестве профиля; профилирование также уменьшает влияние перепада давления на разность температуры между подогретым и охлажденным газом.

2 тангенциальных подвода являются одним из наиболее эффективных вариантов для получения наибольших: φ; η_t; степени охлаждения; теплопроизводительности; 3 сопла, спрофилированные по лемнискате Бернулли, сопоставимы по этим параметрам; 4 тангенциальных сопла сопоставимы по φ и η_t, но уступают по эффектам теплопроизводительности.

Список литературы

1. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения / Ш.А. Пиралшвили, В.М. Поляев, М.Н. Сергеев.; Под ред. И.А. Леонтьева. М.: УНПЦ «Энергомаш», 2000. – 412 с.
2. **Пиралишвили, Ш.А.** Влияние геометрии проточной части вихревых труб на процесс энергоразделения / Ш.А. Пиралишвили, Н.А. Каляева, К.С. Новикова, К. Е Веселов // Прикладная физика и математика. 2020. № 8. С. 3—10.

K. E. Veselov [1], Sh. A. Piralishvili [1], S. V. Veretennikov [1]

[1] Rybinsk State Aviation Technical University named after P. A. Solovyov, Rybinsk, 152934, Pushkin str., 53

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE GEOMETRY OF TWISTING DEVICES ON THE EFFECT OF ENERGY SEPARATION IN A VORTEX TUBE

УДК 007.51

И.М. Молотов, А.И. Счастливцев, В.И. Борзенко, Л.В. Ямщикова

Объединенный институт высоких температур РАН,
111116, Москва, Красноказарменная, 17А

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ВОДОРОДНО-КИСЛОРОДНОМ ПАРОГЕНЕРАТОРЕ

Известно, что водородно-кислородные парогенераторы (ВКП) могут получить широкое применение в энергетике, поскольку они обладают высокими термодинамическими параметрами генерируемого пара, компактностью, маневренностью, экологичностью, быстрым запуском, что даёт преимущество перед установками на традиционном топливе [1].

Наиболее эффективным может стать совместное использование ВКП в составе водородного аккумулирующего комплекса, интегрированного с АЭС [2].

Однако для внедрения ВКП в энергетику существуют нерешенные задачи:

- достижения более полного сгорания водорода
- отсутствие технологических разработок автоматизированных систем, способных обеспечить эффективную интеграцию ВКП в различные схемы электростанций [3]

Для дальнейших исследований полноты сгорания водорода был создан новый образец ВКП, который учитывает накопленный опыт по созданию подобных экспериментальных установок, позволяет более детально изучить процессы, проходящие в ВКП при горении водорода в кислороде.

В работе разъясняются принципиальные отличие нового образца парогенератора, а также рассматривается разработанная автоматизированная система нового образца ВКП, основными задачами которой являются:

- поиск путей минимизации недожога водорода
- ускорение процесса исследования
- обеспечение надежности и безопасности проводимых экспериментов
- реализация и тестирование алгоритмов контрольно-измерительной системы, которые в перспективе могут быть адаптированы для промышленного исполнения системы автоматизации

В заключении представлены первые результаты впервые проведённых экспериментов по стехиометрическому сжиганию водорода в кислороде без смешения получаемого пара с охлаждающим агентом (рисунок 1).

Рассматриваются сопоставления полученных результатов с результатами предыдущего этапа исследования по содержанию непрореагировавшего водорода, которые показывают существенное уменьшение его содержания.

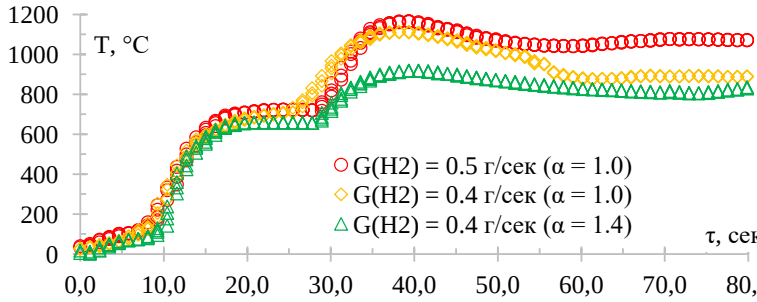


Рис. 1. Температура генерируемого пара в центре камеры сгорания на выхлопе, α – коэффициент стехиометрии, G(H2) – массовый расход водорода

Список литературы

1. **Малышенко С.П., Пригожин В.И., Савич А.Р., Счастливцев А.И., Ильичев В.А., Назарова О.В.** Эффективность генерации пара в водородно-кислородных парогенераторах мегаваттного класса мощности // Теплофизика высоких температур. 2012. Т. 50, No 6. С. 820–829.
2. **Малышенко С. П., Счастливцев А. И.** Анализ системы водородного аккумулирования электроэнергии в сравнении с другими системами аккумулирования //Теплофизика высоких температур. – 2015. – Т. 53. – №. 4. – С. 538-538.
3. **Шапиро В. И., Малышенко С. П., Реутов Б. Ф.** Повышение маневренности ПГУ при использовании водородно-кислородных парогенераторов //Теплоэнергетика. – 2011. – №. 9. – С. 35-40.

I.M. Molotov, A.I. Schastlivtsev, V.I. Borzenko, L.V. Yamshchikova

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

DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED SYSTEM FOR THE EXPERIMENTAL STUDY OF THERMAL PROCESSES IN A HYDROGEN-OXYGEN STEAM GENERATOR

УДК 621.9

Ван Юпен, А.В. Дедов

Национальный Исследовательский Университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Красноказарменная, 14

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА В ГИПЕРВАПОТРОНЕ ДЛЯ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ИТЭР

В качестве одной из компонентов, выдерживающих непрерывное действие плазмы в термоядерном реакторе, первая стенка часто встречается с высоким тепловым потоком, даже до нескольких десятков. Для стабильной работы первой стенки в международном термоядерном экспериментальном реакторе (ИТЭР), высокоэффективные установки для удаления высокого падающего теплового потока должны обязательно рассчитываться. Гипервапотрон – один из самых перспективных установок теплообмена для проекта ядерного синтеза, таких как ИТЭР, JET, EAST и т. д. И КТП – это самый важный параметр, который ограничивает работоспособность теплообменника и влияет на устойчивую работу установки. Поэтому очень важно уточнить механизм процесса теплообмена для гипервапотрона. И конечной целью является построение надежной формулы для прогноза КТП и ККТ специально для гипервапотрона.

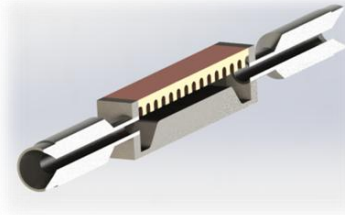


Рис. 1. Текущее проектирование рабочего участка (гипервапотрон).

В этой работе, кроме краткого введения в развитие и особенность гипервапотрона, огромное внимание обращено на проектирование рабочего участка на разных рабочих режимах с помощью Автокада / Солидворкса и моделирование процесса теплообмена, происходящего в гипервапотроне при рабочих параметрах ИТЭР с помощью Ансиса 2019 R3. Внутренняя конструкция гипервапоторона была спроектирована для разных условий работы – однофазным либо двухфазным потоком, существует ли микрообработка поверхности для маленьких канавок и т.д. Точный результат моделирования позволяет дальше правильно проводить физический эксперимент и улучшить настройку соответствующих параметров эксперимента. Например, уточнение распределения температурного поля на поверхности рабочего участка

может руководить помещением термопар в физическом эксперименте гипервапотрона для получения самой высокой температуры, возникающей на поверхности рабочего участка в реальном положении.

Учитывая сложность конструкции рабочего участка, сетки для вычисления гидродинамики были созданы методом неструктурированной сетки. Разные мониторы и контура поля также были помещаемы, чтобы полностью показать состояние гипервапотрона. Проверка независимости сетки была сделана, чтобы доказать целесообразность и правильность созданной сетки. Когда остаточная ошибка была почти стационарной, результат моделирования показал, что текущее проектирование может обеспечить устойчивое поле давления в гипервотороне. Распределение температурного поля неоднородное на поверхности рабочего участка, а имеет некоторое особенное распределение. А рабочие параметры будут сильно влиять на создание турбулентности внутри гипервопотрона.

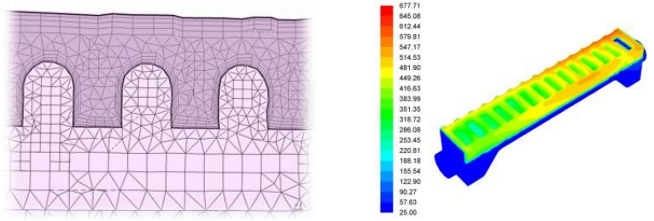


Рис. 2. Создание сетки (л.) и контур температурного поля (п.).

Список литературы

1. Теплообмен и гидродинамика в термоядерных установках / А.В. Дедов. Под ред. Д.Р. Черновы. М.: Издательство МЭИ, 2019. 179 с.
2. **Мазур И.В.** Russian development of enhanced heat flux technologies for ITER first wall / Fusion Engineering and Design. 2012. Т. 87. С. 437—442.

Ван Юпен благодарит за финансовую поддержку Китайский совет по стипендиям (CSC). Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWF-2020-0023).

Wang Youpeng, Dedov Alex

National Research University “MPEI”,
Russia, 111250 Moscow, Krasnokazarmennaya, 14

THE HEAT TRANSFER PROCESS MODELING OF THE HYPERVAPOTRON FOR THE ITER FIRST WALL

УДК 539

С.В. Старинский[1,2], *Ю.Г. Шухов*[1], *А.В. Булгаков*[1,3]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090 Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 1
[2] Новосибирский государственный университет,
630090, Новосибирск, Пирогова, 2
[3]HiLASE Centre, Institute of Physics, Czech Academy of Sciences,
Czech Republic, 25241, Dolní Břežany, Za Radnicí 828

ВЛИЯНИЕ МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ ПЛЕНОК СЕРЕБРА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ SERS

Тонкие пленки благородных металлов благодаря своим уникальным свойствам весьма перспективны для широкого круга задач. Особое внимание уделяется возможности их использования для гигантской спектрсокопии комбинационного рассеяния света (SERS) [1]. Сегодня продолжаются исследования в области оптимизации способов получения SERS покрытий на основе благородных металлов с помощью различных методик.

В данной работе анализируется влияние условий получения серебряных покрытий на их SERS характеристики. Пленки Ag были получены с помощью двух газофазных методик: импульсного лазерного напыления [2] и газоструйного осаждения [3]. Полученные образцы анализировались с помощью сканирующей электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа, оптической спектрофотомерией.

В работе осаждены пленки с различной морфологией. Сопоставлены толщины покрытий с их спектрами пропускания. Получена зависимость массовой толщины покрытий от коэффициента пропускания на длине 200 нм, используя подход разработанный ранее в [4]. Показано, что полученные покрытия демонстрируют усиление сигнала КРС родамина 6Ж (Рис.1). Выявлено, что критическое значение, с точки зрения усиления сигнала, имеет именно морфология покрытий, а не толщина напыления.

Список литературы

1. **Khan T.M. et al.** Various pulsed laser deposition methods for preparation of silver-sensitised glass and paper substrates for surface-enhanced Raman spectroscopy // Appl. Phys. A., 2019. Vol. 125, № 9. P. 1–7.
2. **Starinskiy S.V., Shukhov Y.G., Bulgakov A.V.** Dynamics of pulsed laser ablation of gold in vacuum in the regime of nanostructured film synthesis // Tech. Phys. Lett. 2016. Vol. 42, № 4. P. 411–414..
3. **Быков Н.Ю. et al.** О Газоструйном Методе Осаждения Наноструктурных Пленок Серебра // Журнал Технической Физики. 2019. Vol. 89, № 6. P. 830.

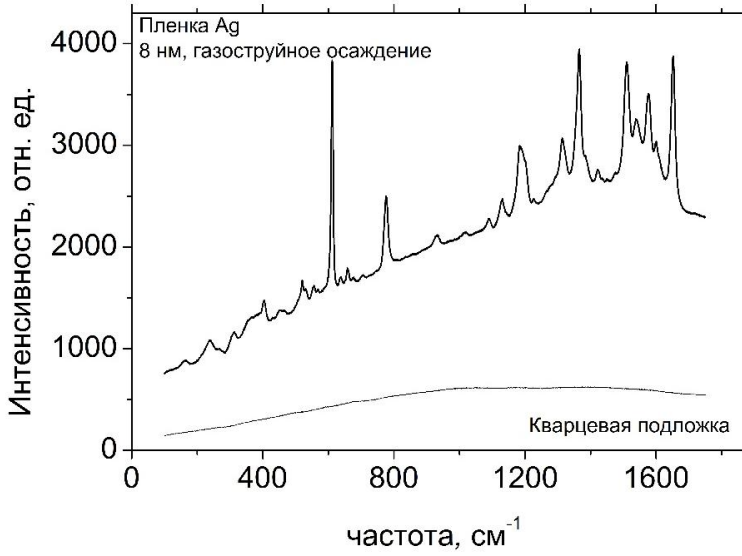


Рис. 1. Сравнение спектров КРС родамина 6Ж, нанесенного на кварцевую подложку и тонкую пленку серебра, осажденную методом газоструйного напыления.

4. **Starinskiy S. V. et al.** An optical method for determination of the mass thickness of thin gold films with arbitrary morphology // Thin Solid Films. 2020. Vol. 714. P. 138392.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержки РНФ (проект №20-79-00139), а также в рамках государственного задания ИТ СО РАН (номер гос. регистрации 121031800214-7).

S.V. Starinskiy[1,2], Yu.G. Shukhov[1], A.V. Bulgakov[1,3]

[1] S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS,
Russia, 630090 Novosibirsk, Lavrentyev Ave. 1
[2]Novosibirsk State University, Russia, 630090 Novosibirsk, Pirogova Str. 2
[3]HiLASE Centre, Institute of Physics, Czech Academy of Sciences, Czech Republic, 25241, Dolní Břežany, Za Radnicí 828

INFLUENCE OF THE METHOD OF SILVER FILMS DEPOSITIONS ON THEIR EFFICIENCY AS SERS SENSOR

УДК 532.5

Д.В. Платонов[1,2], *А.В. Минаков*[1,2], *А.В. Сентябов*[1,2]

[1] Сибирский федеральный университет,
660041, Красноярск, пр. Свободный, 79 (•)
[2] Институт Теплофизики СО РАН,
630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОТУБИН С ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ С ЦЕЛЬЮ РАСШИРЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО ДИАПАЗОНА РАБОТЫ

Одна из функций гидроэлектростанций - обеспечение пиковой выработки электроэнергии. Следовательно, для гидравлических турбин часто требуется быстрое изменение рабочего режима, например, запуск, останов или регулировка выходной мощности. В фазе переходного процесса между различными режимами работы явления пульсации более интенсивны, чем в установившемся режиме [1].

Ещё одной важной проблемой гидротурбостроения является расширение регулировочного мощностного диапазона машин с жесткозакрепленными лопастями (радиально-осевые и пропеллерные турбины). Эта проблема решается применением переменной частоты вращения, но требует соответствующего проектирования лопастных систем. Практическое применение гидроагрегатов, работающих с переменной частотой вращения, в настоящее время является ведущей мировой тенденцией. Теоретически и экспериментально подтверждены их большие преимущества в отношении экономичности, надежности и управляемости.

Перспективным направлением применения переменной частоты вращения являются высоконапорные ГЭС. Одной из проблем являются длинные водоподводящий путь и наличие, как правило, уравнительного резервуара. На малых ГЭС применение ПЧВ приведет к снижению номенклатуры проточных частей и типоразмеров гидротурбин. Применение генераторов с переменной частотой вращения позволяет работать в оптимуме КПД при любых изменениях напора.

В данной работе представлена численная методика для моделирования пространственного турбулентного течения в гидроагрегатах с переменной частотой вращения рабочего колеса. Проведено её тестирование, сравнение результатов с экспериментальными данными.

Так же в работе выполнено исследование работы гидроагрегата с турбиной Фресниса, с изменяемой частотой вращения рабочего колеса.

(•) Д.В. Платонов, platonov-08@yandex.ru

Приведены картины течения в различные моменты времени, показаны графики пульсаций давления в проточном тракте, расхода жидкости и напора.

Список литературы

1. **Doerfler P, Sick M and Coutu A** 2013 Flow-Induced Pulsation and Vibration in Hydroelectric Machinery. Engineers Guidebook for Planning, Design and Troubleshooting. London: Springer

D.V. Platonov, A.V. Minakov, A.V. Sentyabov

Siberian Federal University,
Russia 660041 Krasnoyarsk, Svobodny ave., 79
Institute of Thermophysics SB RAS,
Russia, 630090 Novosibirsk, Acad. Lavrentyev ave., 1

NUMERICAL STUDY OF HYDROTURBINES WITH A VARIABLE ROTATION FREQUENCY WITH THE PURPOSE OF EXPANDING THE EFFECTIVE RANGE OF OPERATION

УДК 536.242

И.И. Грабовский, А.И. Гурьянов

Рыбинский государственный авиационный технический университет
им. П.А.Соловьева, Рыбинск, 152934, Пушкина, 53

ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА ДЛЯ КАТУШКИ ПОСТОЯННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТА МАГНИТОРЕЗОНАНСНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Предложена модель теплообменного аппарата для катушки постоянного электромагнита магниторезонансного плазменного двигателя. Получена методика теплового расчета теплообменного аппарата на основании предварительного расчёта геометрических параметров катушки. Проведена верификация аналитического расчета численным методом расчета.

Для коррекции космических аппаратов (КА) и автоматических межпланетных станций (АМС) используют электрические ракетные двигатели (ЭРД). Так как КА работают в условиях глубокого вакуума, то и двигатели и теплообменные аппараты работают в таких же условиях. Это касается и магниторезонансного плазменного двигателя (МРПД). Такой двигатель имеет катушку постоянного магнита, которой требуется, для поддержания постоянного значения магнитного поля, оставаться при некотором значении постоянной температуры.

Испытания в наземных лабораториях и упрощения расчетов, а также более дешевый материал конструкции теплообменного аппарата и двигателя требуют работы в комнатных температурах при нормальных условиях. Проектируемый теплообменный аппарат создается не для работы в космическом пространстве, но для испытания в лаборатории. Это обуславливает выбор способа охлаждения – прокачкой воды.

Все перечисленные выше факторы оказывают влияние на способ проектирования и определяют методику расчета катушки, как геометрическую, так и тепловую ее часть. Аксиально-симметричная катушка постоянного магнита должна обеспечивать магнитную индукцию на удалении от среза катушки в 17 мм, величину индукции в 0,079 Тл. Для этого необходимо рассчитать количество витков катушки, длину ее намотки и протекающий по катушке постоянный ток. Принимая, что суммарное сопротивление катушки равно 1 Ом, с запасом, извлекается ток в 24 А. Внутренний радиус катушки, определяется как сумма радиусов апертуры магнитопровода, толщины стенки, величины внутреннего зазора для прокачки теплоносителя и радиуса витка катушки. Апертура для МРПД равна 124 мм. Толщина промежутка для прокачки

теплоносителя вблизи стенки выбирается равной 1,5 мм, а толщину провода выбирается равной 3 мм. Сумма всех радиусов дает величину 68 мм. Далее рассчитывается индукция одного витка катушки, а после и одного слоя того же радиуса. Так как габариты установки ограничены в размерах, оптимальным числом слоев для всей катушки является 54, однако для одного полюса 27, что определяет величину намотки как 81 мм.

Так как катушку необходимо охлаждать равномерно, целесообразно сделать зазоры между ее витками для прокачки теплоносителя, а сами подводы расположить в шахматном порядке. Учитывая это, задаётся расстояние между слоями катушки в 2 мм. Под выбранный диаметр 3 мм, с учетом толщины изоляции, подбираем медный провод ВВГнг 2,5х2, с удельным сопротивлением меди при 20˚С 0,018 Ом·мм^2/м, которое обеспечивает сопротивление в 0,96 Ом.

Для корректной работы установки и соблюдения расчетного режима необходимо поддерживать температуру катушки в окрестностях температуры в 20˚С. При этом теплота отводимая от катушки равна 420,5 Вт/м^2 согласно закону Джоуля-Ленца. Для определения расхода воды составляется уравнение теплового баланса, где находится средний коэффициент теплоотдачи и определяется число Рейнольдса через число Нуссельта для обтекания коридорного поперечного пучка труб. При этом находится режим обтекания при заданных значениях температуры стенки и омывающей жидкости. Итерационным методом найдена оптимальная величина расхода 17 мг/с и температуры воды в 17˚С.

Все данные с теплового расчета успешно прошли верификацию численными методами расчета, что означает справедливость метода теплового и геометрического расчета. Построена модель теплообменного аппарата.

Список литературы

1. **М.А. Любчик**, Расчет и проектирование электромагнитов постоянного и переменного тока. Ред. Ю.П. Устинова, 1959 – 225 с.
2. **Oslyak S., Ducci C., Rossetti P., Andrenucci M.** Characterization of an adjustable magnetic field, low-power Hall Effect Thruster // IEPC-2011-143, 32nd International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany, 11–15 Sept. 2011.

I.I. Grabovsky, A.I. Guryanov

Federal State Educational Budget Institution of higher professional education
“P. A. Solovyov Rybinsk State University of Aviation and Technics”,
Russia 152934 Rybinsk, Pushkina, 53

THE RESEARCH OF THE DESIGN FEATURES OF A HEAT EXCHANGER FOR A PERMANENT ELECTROMAGNET COIL OF A MAGNETORESONANCE PLASMA ENGINE

УДК 536.2

П.Н. Карпов

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

ШИРОКОПОТОЧНАЯ ИМПАКТНАЯ СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ МНОГОСТРУЙНОГО ДВУХФАЗНОГО ВОЗДУШНО-КАПЕЛЬНОГО ИСТОЧНИКА

Целью исследований является создание методики, которая позволит проводить предварительную интегральную оценку эффективности выбранных параметров исследуемой импактной многоструйной двухфазной воздушно - капельной системы для охлаждения плоских поверхностей большой площади. Наиболее часто встречающиеся принципы построения систем интенсивного тепломассопереноса опираются на импактные струйные потоки, которые позволяет снимать значительные тепловые нагрузки при относительно малых расходах жидкой фазы.

Эффективность охлаждения нагретой поверхности двухфазным потоком зависит от сочетания большого количества гидро- и аэродинамических параметров, конструктивных особенностей системы «источник-охлаждаемая поверхность», что в большой степени осложняет проведение оценочного расчёта с допустимой погрешностью.

В этой связи актуальной задачей является попытка обобщения экспериментальных данных по охлаждению нагретой поверхности с помощью импактной многоструйной двухфазной воздушно-капельной системы, используя безразмерные критерии подобия процессов теплообмена. Такое обобщение позволит проводить расчеты среднего по охлаждаемой поверхности коэффициента теплоотдачи при различных вариациях параметров импактной воздушно-капельной системы и находить оптимальные варианты комбинации этих параметров.

Для проведения исследований была создана установка [1], представляющая собой импульсную многоструйную систему охлаждения. Система включает в себя инжектор, цифровой калориметр, теплообменник и автоматизированную систему регистрации экспериментальных данных.

Для формирования спутных потоков воздуха и воды был разработан и изготовлен воздушно-капельный двухкамерный источник. На плоской поверхности источника, обращенной к охлаждаемой поверхности, были установлены в шахматном порядке 25 сопел инжектора для подачи воздуха и 16 сопел для подачи воды [2]. Сопло инжектора для воздуха имело диаметр Dg=0,35 мм. Инжектор для воды имел сопла диаметром Dl=0,125 мм.

Подача воды осуществлялась управляемым электромагнитным клапаном, режим работы которого можно программировать в широком диапазоне.

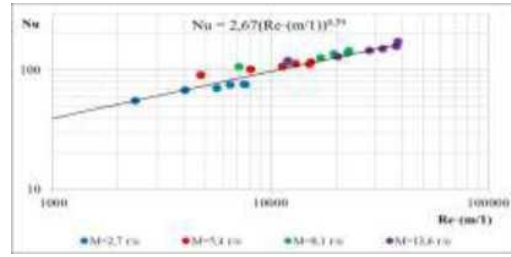


Рис. 1. Безразмерная зависимость интегрального коэффициента теплоотдачи

Были проведены эксперименты по измерению интегрального коэффициента теплоотдачи плоской пластины при охлаждении ее многоструйной импактной воздушно-капельной системой. Эксперименты проведены при изменении скорости спутного воздушного потока в диапазоне (0 - 5,9) м/с и расхода охлаждающей капельной жидкости в диапазоне удельных расходов (0,14 - 0,69) кг/(с*м2). Жидкость инжектировалась в поток в импульсном режиме. Длительность одного импульса инжекции составляла 2мс, частота следования импульсов принимала значения: (1, 2, 3, 5)Гц.

Предложена эквивалентная модель многоструйной импактной воздушно-капельной системы для охлаждения плоской поверхности. Модель позволяет в условиях проведения экспериментов обобщить полученные экспериментальные данные в виде аппроксимирующей безразмерной степенной зависимости. Такая аппроксимация может позволить рассчитывать параметры охлаждающей многоструйной импактной воздушно-капельной системы, имеющей различные геометрические и расходные характеристики

Список литературы

1. **Nazarov A.D., Serov A.F., Terekhov V.I.**/The influence of gas co-flow in a pulse aerosol on evaporation cooling process//High Temperature. 52 (2014) 576579.
2. **Karpov P., Nazarov A., Serov A., Terekhov V.**/ Evaporative cooling by a pulsed jets pray of binary ethanol-water mixture//Technical Physics Letters, 41 (2015) 668-671

P.N. Karpov

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

WIDE-FLOW IMPACT COOLING SYSTEM BASED ON MULTI-JET TWO-PHASE AIR-DROP SOURCE

УДК 629.735.33

А.Р. Лепешкин[1], *М.Ю. Ильеня*[1], *О.И. Ильинская*[1]

[1] Московский авиационный институт – Научно-исследовательский университет, 125993, Москва, Волоколамское ш., 4

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ВСУ

Эксперименты по увеличению скорости вертолетов проводились с момента появления винтокрылых машин. Совершенствовались конструкция лопастей, двигательные установки и конструкция самого планера. В конце концов, предел повышения аэродинамического качества для традиционных схем был почти достигнут. Основными препятствиями оказались значительное увеличение сопротивления лопасти на сверхзвуковых скоростях и явление срыва потока с отступающей лопасти несущего винта [1,]. В настоящий момент все ведущие производители вертолетов исследуют возможности модификации законцовок и профилей лопастей несущих винтов, разнообразных схем управления и приводов.

Среди зарубежных разработок схемы с традиционным несущим ротором выделяется выпущенный в 1967 году Lockheed AH-56 Cheyenne, который совершил полет со скоростью 393 км/ч. Проект, по сути, был полностью инновационным: использовалась классическая схема с рулевым винтом на хвостовой балке, дополненная толкающим винтом в торце. Вертолет имел оригинальную схему отбора мощности двигателя, позволяющую плавно регулировать обороты толкающего и несущего винта в различных режимах полета. В 2016 году вертолет Ми-24 достиг скорости 405 км/ч, что несколько больше мирового рекорда, который принадлежал британскому вертолету Westland Lynx в 1986 году.

Анализ литературных источников показывает, что со дня существования несущих вертолетных винтов остро стоит проблема создания конструкции несущих винтов с возможностью изменения основных геометрических параметров в динамике. Это обусловлено тем, что винты фиксированного шага не являются оптимальными для всех этапов эксплуатации. Повышение эффективности работы вертолетных силовых установок (ВСУ) можно достичь с применением несущего винта с изменяемой геометрией лопастей, а также изменением угла установки и крутки лопастей в динамике. Так же, как и аэродинамические силы крыла, сила тяги винта зависит от его геометрических параметров: формы профилей, из которых набрана лопасть, и распределения их по размаху лопасти (крутки лопасти); формы в плане и размеров лопасти (длины лопасти, диаметра винта и, соответственно, площади, ометаемой винтом); числа лопастей винта.

В данной работе предлагается в ВСУ использовать несущий винт изменяемого диаметра в зависимости от разных эксплуатационных режимов. В данном винте лопасти оканчиваются поворотными частями (консолями). Причем поворотные консоли установлены с возможностью управления ими управляющим кольцом автомата перекоса Юрьева с помощью электропривода или посредством тяг, рычагов и гидравлических систем. На повышенных и максимальных скоростях полета диаметр винта уменьшается с помощью поворотных консолей и за счет этого уменьшаются потери мощности ВСУ, благодаря снижению аэродинамического сопротивления лопастей и эффекта волнового сопротивления (кризиса) в обтекании концевых сечений наступающих лопастей. Кроме того, уменьшается эффект волнового срыва обтекания, связанный с возникновением скачков уплотнения и соответствующего давления на лопастях, что повышает безопасность полетов. Уменьшение указанных волновых эффектов снижает вибрации [3]. Выполненные расчеты мощностного режима ВСУ с изменяемым диаметром винта в диапазоне повышенных скоростей полета с учетом указанных выше факторов и рекомендаций [1, 2] позволяют сделать вывод о возможности увеличения скорости вертолетов на 15-25 %.

Список литературы

1. **Володко А.М.** Безопасность полетов вертолетов. М.: Транспорт, 1981. – 224 с.
2. **Кеба И.В.** Летная эксплуатация вертолетных газотурбинных двигателей. М.: Транспорт, 1976. – 279 с.
3. **Лепешкин А.Р., Ильинская О.И., Маликов С.Б.** Динамика и прочность авиационных газотурбинных двигателей: Учеб. пособие. - М.: Изд.-во МАИ. 2020. - 100 с.

A.R. Lepeshkin [1], M.Y. Ilyenya [1], O.I. Ilinskaya [1]

[1] Moscow Aviation Institute - National Research University,
125993, Moscow, volokolamskoe h., 4

INCREASING THE EFFICIENCY OF HPP

УДК 621.311.22

Г.Е. Масленников, И.П. Лазебный, В.В. Назарова, А.Ф. Рыжков

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 620002, Екатеринбург, Мира, 19

ПГУ УРАЛЬСКОГО РЕГИОНА С СИСТЕМОЙ КАРБОНИЗАЦИИ ДЛЯ УЛАВЛИВАНИЯ CO2

В последние годы стало очевидно, что антропогенные выбросы парниковых газов, образующиеся в результате сжигания ископаемого топлива, приводят к глобальному потеплению и изменению климата.

Одним из вариантов решения данной проблемы предлагается метод CCS (Carbon Capture and Storage – улавливание и хранение углерода) [1], включающий выделение CO_2 из дымовых газов промышленных и энергетических источников, его транспортировку к месту хранения и долгосрочную изоляцию от атмосферы. Более перспективным методом является минерализация CO_2 путем карбонизации материалов с повышенным содержанием основных оксидов: горные породы, золошлаковые отходы (ЗШО), отходы строительной индустрии и др.

В настоящей работе рассмотрены вопросы создания энергоэффективных и экологически чистых ресурсосберегающих технологий энергогенерации на базе органического топлива, твёрдых отходов и материалов. Предложена комплексная технология, позволяющая утилизировать региональные промотходы совместно с производимыми на ТЭС выбросами углекислого газа CO_2, что актуально в рамках подписанного Россией Парижского соглашения по климату.

Комплексный подход к проблеме минерализации выбросов CO_2 за счет карбонизации золошлаковых отходов ТЭС и других искусственных декарбонизированных материалов по данным МЭА является среди новейших направлений одним из наиболее перспективных в решении глобальных экологических проблем энергетики развитых и развивающихся экономик. Его применение может заметно снизить нагрузку на геологическое захоронение CO_2, исключить связанные с этим краткосрочные и пролонгированные экологические риски, сдержать накопление промышленных отходов и перейти к ресурсосбережению за счёт замены ими природных минералов после обработки продуктами сгорания.

Основной механизм минерализации CO_2 осуществляется в два этапа – гидратация щелочных оксидов, например, оксида кальция и их карбонизация в соответствии со следующими брутто реакциями:

$$CaO+H2O \rightarrow Ca(OH)_2$$

$$Ca(OH)_2+CO_2 \rightarrow CaCO_3+H_2O$$

Термодинамический анализ схемы ПГУ с установкой полусухой карбонизации выполняется с использованием программного комплекса

COCO Simulator. В качестве исходного объекта расчета взята схема ПГУ Академической ТЭЦ. Расчетная схема полусухого процесса карбонизации, составленная в соответствии со схемой испытанной пилотной установки [2], представлена на рис. 1.

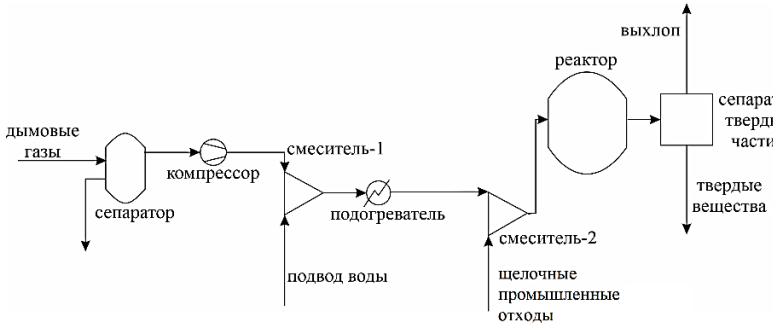


Рис. 1. Расчетная схема узла карбонизации.

Эффективность карбонизации для сухого процесса принята равной 33 %. Перед подачей в реактор газ увлажнялся до 16 %. Степень конверсии CO2 при этом составляет 22,6 %.

Вовлечение в процесс химического рециклинга региональных ресур-сов (золошлаки иных производств, строительные отходы программ реновации жилья и др.) может поднять степень безотходности ТЭС по выбросам CO_2 до 70-90%.

Возможность решения в рамках одного технологического процесса многофакторной задачи утилизации твердых и газообразных продуктов различного типа обеспечивает коммерческую привлекательность настоящего предложения.

Список литературы

1. **Dindi A., Quang D.V., Vega L.F., Nashef E., Abu-Zahra M.R.M.** Applications of fly ash for CO_2 capture, utilization, and storage // J. CO_2 Util. 2019. Т. 29. С. 82—102.
2. **Reddy K., Weber H., Bhattacharyya P., Morris A., Taylor D., Christensen M., Foulke T., Fahlsing P.** Instantaneous capture and mineralization of flue gas carbon dioxide: Pilot scale study // Nat. Preced. 2010. December.

G.E. Maslennikov, I.P. Lazebny, V.V. Nazarova, A.F. Ryzhkov

Ural Federal University,
Russia 620002 Yekaterinburg, Mira, 19

CCGT UNIT OF THE URAL REGION WITH A CARBONIZATION SYSTEM FOR CAPTURING CO2

УДК 544.63:532

Е.Е. Хлоповских[1], А.А. Тычинина[1], И.М. Винокурова[1], А.А. Болдырев[1], Л.Б. Сафонова[1]

[1]Воронежский государственный технический университет,
Воронеж, 394000, Плехановская, 11

ИЗУЧЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Проблема расчета скорости электрохимических процессов при анодной обработке металлов связаны с особенностями процессов в межэлектродном промежутке, кинетическими особенностями процесса растворения [1, 2]. В движущейся жидкой среде возникают внутренние силы механической природы, учитывающие давление и вязкое трение. Для небольшой площадки поверхности dS в потоке силы слоев жидкости разлагаются на составляющие, направленные по касательной и по нормали к dS рис. 1.

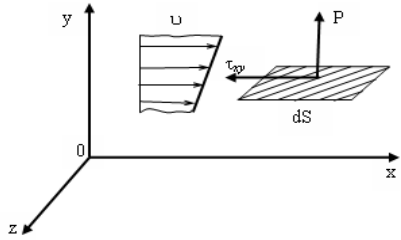


Рис.1. Внутренние силы, возникающие в движущейся жидкой среде сжимаемостью среды получаем уравнение

Нормальную составляющую силы не зависящую от ориентации площадки берем за давление P. Касательная составляющая силы, зависит от ориентации площадки и обозначается тензором касательных напряжений, имеющим девять компонентов. С учётом распространения теплового потока за счёт теплопроводности, конвективной составляющей и химического потенциала дифференциальные уравнения тепло- и массопереноса, определяемые через параметры системы (плотность раствора, температура, химический потенциал, коэффициент диффузии D) для стационарных условий могут быть представлены в виде выражений [1]:

$$\frac{\partial i}{\partial \tau}=\frac{\lambda}{\rho}\cdot\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)-\left(\varpi_x\cdot\frac{\partial i}{\partial x}+\varpi_y\cdot\frac{\partial i}{\partial y}+\varpi_z\cdot\frac{\partial i}{\partial z}\right)-\left(\frac{\partial}{\partial x}\sum j_{x\cdot i}\cdot i_i+\frac{\partial}{\partial y}\sum j_{y_i}\cdot i_i+\frac{\partial}{\partial z}\sum j_{z\cdot i}\cdot i_i\right) \quad (1)$$

$$\rho\frac{\partial m_i}{\partial \tau}=\rho\cdot D\cdot\left(\frac{\partial^2 m_i}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 m_i}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 m_i}{\partial z^2}\right)-\rho\cdot\left(\varpi_x\cdot\frac{\partial m_i}{\partial x}+\varpi_y\cdot\frac{\partial m_i}{\partial y}+\varpi_z\cdot\frac{\partial m_i}{\partial z}\right)+\rho\cdot m_i\cdot div\varpi\cdot \quad (2)$$

При условии, что мы пренебрегаем сжимаемостью среды, уравнение неразрывности примет следующий вид [2]

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v}\nabla)\vec{v} = -\left(\frac{1}{\rho}\right)\nabla p + \gamma\nabla\vec{v}, \tag{3}$$

где ρ - плотность жидкости; $\gamma = \mu / p$ - кинематическая вязкость;

t - время; $\nu = (\nu_x, \nu_y, \nu_z)$ - вектор плотности потока массы.

Граничным условием для вязкой жидкости является равенство скорости нулю на твердой границе потока А

$$\vec{v}(\vec{r}, t) = 0 \qquad (\vec{r} \in A), \tag{4}$$

где r = (x, y, z) - радиус-вектор и декартовы координаты точки в пространстве.

В турбулентных потоках скорость и давление в большей части представляется как сумма осредненных (по времени или статическому ансамблю) и пульсационных величин [1, 2]

$$\vec{v} = \vec{u} + \vec{v}'; \quad p = \vec{p} + p'; \quad \vec{u} = <\vec{v}>, \tag{5}$$

где u - средняя скорость движения флуктуаций (здесь и далее статическое осреднение обозначается чертой над величиной или угловыми скобками < >, пульсационные величины обозначаются штрихами).

Таким образом, здесь в первую очередь возникает задача установления модельных зависимостей между параметрами состояния межэлектродного промежутка, кинетическими особенностями процесса растворения и технологическими показателями обработки.

Список литературы

1. **Мандрыкина, И. М.** Исследование взаимосвязи термокинетических и электрохимических параметров при импульсных режимах обработки титановых сплавов. Дис…. Воронеж. 1998. -210 с.
2. **Винокурова, И.М.** Определение оптимальных режимов при электрохимической размерной обработке титана и его сплавов с учетом особенностей тепломассопереноса [Текст] / И.М. Винокурова, В. П. Смоленцев // Изв. вузов Орел ГТУ. Сер. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. -2009. № 1/273(559). -С. 67-73.

E.E. Khlopovskikh[1], A.A. Tychinina[1], I.M. Vinokurova[1], A.A. Boldyrev[1], L.B. Safonova[1]

[1]Voronezh State Technical University,
Voronezh, 394000, Plekhanovskaya, 11

STUDY OF CHANGES IN HYDRODYNAMIC CONDITIONS IN ELECTROCHEMICAL SYSTEMS

УДК 536.632:544.6

А.А. Тычинина[1], Е.Е. Хлоповских[1], И.М. Винокурова[1], А.А. Болдырев[1]

[1]Воронежский государственный технический университет,
Воронеж, 394000, Плехановская, 11

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Технологический процесс электрохимической обработки металлов требует учитывать специфические особенности: очень высокие плотности тока на электродах; большие скорости протока электролита; очень малое расстояние между электродами - межэлектродный зазор (МЭЗ). Аналитическая оценка тепловых эффектов в протекающих процессах показывает, что в большей мере они обусловлены последующими стадиями химических реакций. Учитывая, что управление параметрами электрического поля можно осуществить намного эффективнее, чем теплового, задача сводится к выявлению зависимостей

$$\text{grad } T = f(i_a, \tau, Q, f), \qquad (1)$$

где grad T - градиент теплового поля (^oC/см); i_a- плотность анодного тока; τ - длительность импульсного тока (мкс); Q – скважность импульсов; f - частота следования (Гц).

На рис. 1 приводится схема этапов построения полной математической модели электрохимического процесса применительно к ЭХРО титана и его сплавов [1, 2].

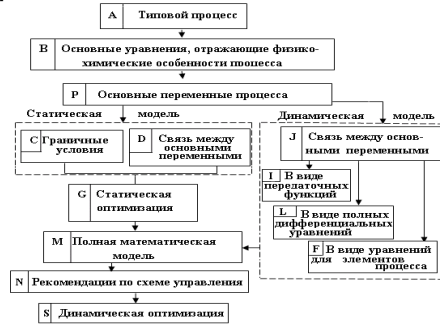


Рис. 1. Стадии построения математической модели электрохимического процесса

В качестве типового процесса [A] - предлагается технология электрохимической размерной обработки титана. Основными уравнениями, отражающими физико-химические особенности процесса занимается блок [B]. Применение процесса [P] в статической и динамической моделях различно вследствие неоднозначности условий анодной обработки титана. Граничные условия в статической модели имеют более узкий диапазон изменения переменных. Связь между переменными, например, в условиях статики,

определяющая локальное изменение удельной энтальпии, вызванное процессами теплопроводности, конвекции и молекулярной диффузии в статической модели, описываем известным уравнением теплопереноса

$$\frac{di}{d\tau} = \frac{\alpha}{\rho}\nabla^2 t - \left(\omega_x \frac{di}{dx} + \omega_y \frac{di}{dy} + \omega_z \frac{di}{dz}\right) - \frac{1}{\rho} div \sum \vec{J}_i \cdot i_i \quad . \qquad (2)$$

Связь между основными переменными в динамической модели описывается уравнением более сложного вида.

Локальное изменение температуры во времени в зависимости от технологических параметров может быть определено по формуле

$$\Delta T = \tau / \left(a + (1/i)\cdot\tau\right), \qquad (3)$$

где τ - время электролиза, мин; i - плотность тока, а/дм^2. Значения коэффициента, a определяются из номограмм и линейно зависят от τ. Эти поправки вводятся блоком [F] для всех элементов процесса.

Полные дифференциальные уравнения динамической модели с учётом вводимых поправок формируются блоком [L]. Сравнение выходных параметров процесса по статической и динамической моделям осуществляется блоком [M]. Здесь же окончательно формируются возможные варианты алгоритмов системы управления, с учётом использования элементов обратной связи и основных положений теории устойчивости систем регулирования. Рекомендованные в блоке [N] схемы управления отрабатываются на макетах лабораторных стендов и формируются в блок управления, включающий входные и выходные устройства блока динамической оптимизации [S].

Таким образом, главной задачей исследований становится изучение взаимосвязи температурных и электрических полей, методики управления ими с целью обеспечения стабилизации условий обработки в оптимальных режимах.

Список литературы

1. **Мандрыкина, И. М.** Исследование взаимосвязи термокинетических и электрохимических параметров при импульсных режимах обработки титановых сплавов. Дис…. Воронеж. 1998. -210 с.
2. **Винокурова, И.М.** Определение оптимальных режимов при электрохимической размерной обработке титана и его сплавов с учетом особенностей тепломассопереноса [Текст] / И.М. Винокурова, В. П. Смоленцев // Изв. вузов Орел ГТУ. Сер. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. -2009. № 1/273(559). -С. 67-73.

A.A. Tychinina[1], E.E. Khlopovskikh[1], I.M. Vinokurova[1], A.A. Boldyrev[1]

[1]Voronezh State Technical University,
Voronezh, 394000, Plekhanovskaya, 11

DETERMINATION OF TEMPERATURE FIELDS IN CONDITIONS OF ELECTROCHEMICAL TECHNOLOGIES

УДК 536:544.6

А.А. Тычинина[1], Е.Е. Хлоповских[1], И.М. Винокурова[1], А.А. Болдырев[1]

[1]Воронежский государственный технический университет,
Воронеж, 394000, Плехановская, 11

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОЛИТОВ В ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЯХ

При электрохимической обработке металлов на величину суммарного теплового эффекта на электродах оказывает существенное влияние теплота гидратации образующегося в растворе иона. При обработке таких металлов, как хром, сплавы железа, алюминий, титан, эффект тепловыделения на электроде (аноде) может в значительной мере изменяться за счёт различия энергии образования соответствующих гидратов. Для некоторых типов ионов значения теплот гидратации представлены в таблице.

Ионные потенциалы и теплоты гидратации некоторых катионов

Ион	Ионный потенциал	Теплота гидратации, Ккал/моль	Ион	Ионный потенциал	Теплота гидратации, ккал/моль
Be^{2+}	5,26	-587	Cr^{3+}	4,82	-1105
Al^{3+}	5,77	-1122	(Cr^{6+})	11,54	-
Pb^{2+}	2,38	-359	(Mn^{7+})	25,22	-
Fe^{3+}	4,70	-1072			

Увеличение температурных перепадов в направлении вектора скорости протока электролита в межэлектронном пространстве (МЭП) закономерно связано с ростом температуры, по мере транспорта газа теплоносителя вдоль поверхности электрода. Количество теплоты аккумулированной в зоне реакций в (МЭП) в общем случае описывается уравнениями [1]:

$$Q_n = \sum_{n=1}^{n=\infty} \Delta q_n, \qquad (1)$$

$$q_{п1} < q_{п2} + \Delta q_{п1} < q_{п3} + \Delta q_{п2} < q_4 < \Delta q_{п3} < q_5 + \Delta q_4, \qquad (2)$$

где слагаемое $\Delta q_{Пn}$ - представляет собой количество теплоты, которое перенесено за промежуток Δt из нижерасположенной зоны за счёт протока электролита.

При обработке алюминиевой фольги в электролите, содержащем водный раствор $NaNO_3$ и NaCl, при концентрации каждого из компонентов 0,5 М, температурный эффект на катоде составляет всего 10 ^oC при режимах обработки $\boldsymbol{i}$ = 400 мА/см^2, $T_{обр}$=180 с. Аналогичный режим обработки в электролите состава HCl – 1,84 м/л, HNO_3 – 0,34 м/л, N_3PO_4 – 0,34 м/л, приводит к повышению температуры в прикатодном слое до 50÷60 ^oC, в зависимости от № полосы измеряемой зоны. Это

может быть объяснено различием электродных процессов на катоде в рассмотренных электролитах. В электролите, содержащем $NaNO_3$ на катоде, становится вероятным процесс восстановления нитрат-иона по схеме:

$$NO_3^- + 2H_2O \rightarrow NO + 4OH^- \ (E^o = -0{,}14 \text{ В}). \qquad (3)$$

Энтальпия этого процесса составляет $\Delta H^o_{298} = +21{,}57$ ккал/моль. Эндотермический эффект этой реакции подавляет процесс тепловыделения за счёт реакции молизации водорода.

Качественно, на аноде во всех перечисленных электролитах протекают одни и те же процессы, но механизм растворения алюминия в перечисленных выше электролитах различен (на рис. 1.)

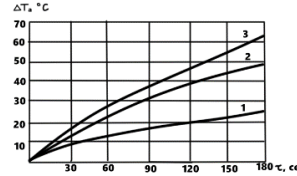


Рис. 1. Влияние анионного состава электролита на величину термокинетического эффекта на аноде: 1- 0,5 М HCl, 2 - 0,5 М HNO_3, i = 500 мА/см^2, 3 - 0,5 М $HClO_4$, H_3PO_4-0,3 м/л

Общий вид уравнения для расчёта температурного эффекта примет вид

$$Q_{тк} = k_1 \cdot m_1 \cdot (-\Delta H_1) + k_2 \cdot m_2 \cdot (-\Delta H_2) + \ldots\ldots k_n \cdot m_n \cdot (-\Delta H_n); \qquad (4)$$

где k_1 - весовой коэффициент реакции; $\mathbf{m_1}$ - мольная масса образующего вещества; - ΔH_1 - тепловой эффект реакции.

Значения термокинетических эффектов для каждой стадии химической и электрохимической реакции будут определяться весовыми коэффициентами и термохимическими эффектами соответствующих процессов.

Список литературы

1. **Винокурова, И. М.** Предпосылки выбора электролита при электрохимическом формообразовании [Текст] / И. М. Винокурова, А.В. Ермилов //Авиакосмические технологии (АКТ-2015): тр. XVI междунар. науч.-техн. конф. и школы молодых ученых, аспирантов и студентов.-Воронеж: ООО Фирма “Элист”, 2015. -С. 99-107.

A.A. Tychinina[1], E.E. Khlopovskikh[1], I.M. Vinokurova[1], A.A. Boldyrev[1]

[1]Voronezh State Technical University,
Voronezh, 394000, Plekhanovskaya, 11

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF ELECTROLYTES IN ELECTROCHEMICAL TECHNOLOGIES

УДК: 629.7.036

А.М. Коченов[1], *А.Р. Лепешкин*[1], *О.И. Ильинская*[1]

[1] Московский авиационный институт – Научно-исследовательский университет, 125993, Москва, Волоколамское ш., 4

РАЗРАБОТКА НАСОСА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДАЧИ ТОПЛИВА В СИСТЕМУ АВИАЦИОННОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Работа посвящена актуальной теме - разработке перспективного топливоподкачивающего центробежного насоса для топливной системы авиационного газотурбинного двигателя [1-3].

В работе приведены требования к разрабатываемому изделию. Описывается существующая конструкция насоса и подробно приводится для сравнения разработанная конструкция топливоподкачивающего центробежного насоса, ее технические характеристики и особенности работы.

Важное значение для оценки эффективности новой разработки в данной работе имеет проведенное сравнение теоретических и экспериментальных характеристик насосов штатного и вновь разработанного.

Анализ результатов проделанной работы показывает, что вновь разработанный перспективный насос по всем основным характеристикам таким как перепад давления, потребляемая мощность и КПД стабильнее и лучше исходного насоса и повышает эффективность подачи топлива в топливную систему авиационного газотурбинного двигателя. При этом перепад давления и потребляемая мощность значительно меньше.

Также при проектировании нового топливоподкачивающего центробежного насоса, конструкторские решения привели к улучшению внутренней герметичности и уменьшению массы изделия. Стоит отметить, что разрабатываемый перспективный топливоподкачивающий центробежный насос стал унифицированным, так как предназначен для использования на четырех типах двигателей.

Список литературы

1. **Скубачевский, Г.С.** Авиационные газотурбинные двигатели. Конструкция и расчѐт деталей. М.: Машиностроение. 1981. 552 с.
2. **Чигрин В.С., Белова С.Е.** Системы ГТД. Учебное пособие. Рыбинск: РГАТУ. 2011. 64 с.
3. **Чигрин В.С., Белова С.Е.** Системы топливопитания ГТД. Учебное пособие. Рыбинск: РГАТУ. 2005. 18 с.

A.M. Kochenov[1]*,A.R. Lepeshkin*[1]*, O.I. Ilinskaya*[1]

[1]Moscow Aviation Institute (National Research University),
Russia, 125993 Moscow, Volokolamskoe Shosse, 4

DEVELOPMENT OF A PUMP TO INCREASE THE EFFICIENCY OF FUEL SUPPLY TO THE AIRCRAFT GAS TURBINE ENGINE SYSTEM

УДК 533.69, 51.74

Д. М. Божеева[1], Ар.А. Дектерев[2], А.А. Дектерев[1,2]

[1]Сибирский федеральный университет, Красноярск, 660041, пр. Свободный 79
[2] Красноярский филиал Институт теплофизики СО РАН,
Красноярск, 660036 Академгородок 44/50, оф.501

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ КОЛЕБЛЮЩЕГОСЯ КРЫЛОВОГО ПРОФИЛЯ

Форма крыла является одним из важных факторов при определение аэродинамических свойств летательного аппарата. Характеристики крыла часто ухудшаются из-за отрыва потока, который сильно зависит от конструкции профиля крыла. Конструкция крыла должна учитывать условия эксплуатации самолетов или беспилотных летательных аппаратов. В последние годы ведутся активные работы по созданию беспилотного летательного аппарата вертикального взлета и посадки с циклическими движителями, содержащими колеблющиеся лопасти. Цель данной работы – тестирование математической модели обтекания отдельного крылового профиля, движущегося по сложной траектории, для совершенствования в дальнейшем циклических движителей.

Для моделирования турбулентного потока в работе используется RANS подход, основанный на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, замкнутых при помощи полуэмпирических моделей турбулентности SST k-ω и Transition SST.

В циклическом движителе крыловые профили вращаются вокруг оси движителя, при этом совершают колебательное движение (изменение угла атаки), что приводит к формированию потока. Для реализации в Fluent такого способа движения крылового профиля используется сочетание метода скользящих сеток и специальный алгоритм изменения угла атаки и положения лопасти. Задача пространственного, турбулентного, нестационарного течения требует значительных вычислительных ресурсов, поэтому для ускорения расчетов применяется распараллеливание задачи на несколько вычислительных ядер ЭВМ.

Предварительно выполнены тестовые расчеты аэродинамических характеристик крылового профиля NACA 0016. Расчеты выполнялись при значении числа Рейнольдса вычисленного по длине хорды крыла: Re_c=300000, что соответствует скорости набегающего потока U_∞=20 м/с. Угол атаки варьировался от 0 до 25 градусов. Как показали расчеты, выбранные модели турбулентности и метод расчета хорошо описывают обтекание крылового профиля в широком диапазоне изменения угла атаки.

Далее более выполнено моделирование колебания крылового профиля. При решении этой задачи геометрические параметры крылового профиля были идентичны тестовому профилю. Рассматривались ре-

жимы течения в широком диапазоне чисел Струхаля (от 0,028 до 0,12) при двух числах Re (100000, 200000). На рисунке показаны результаты сопоставления данных эксперимента и моделирования силы сопротивления и подъемной силы для колеблющегося крылового профиля.

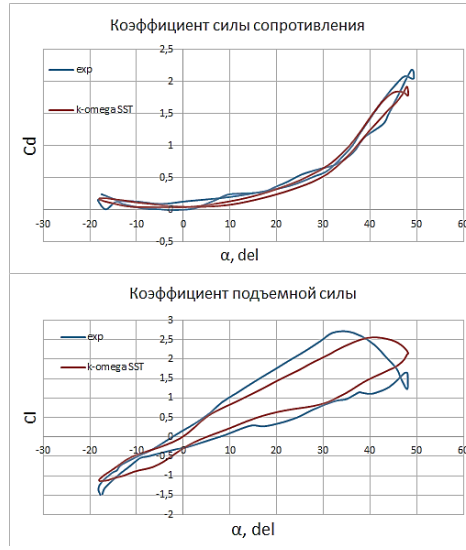


Рисунок. Зависимость силы сопротивления и подъемной силы для крыла NACA 0016.
U_∞=8 м/с, Re=10^5, f=1.3 Гц, St=0.0284.

Результаты моделирования позволили правильно смоделировать аэродинамические характеристики крыла в широком диапазоне характеристик набегающего потока и частотах колебания профиля.

D.M. Bozheeva[1], *Ar.A. Dekterev*[2], *A.A. Dekterev*[1,2]

[1]Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Svobodny Ave., 79
[2]Krasnoyarsk Branch Institute of Thermophysics SB RAS,
Krasnoyarsk, 660036 Akademgorodok 44/50, office 501

CALCULATED STUDY OF THE AERODYNAMICS OSCILLATING OF THE WING PROFILE

УДК 504.35

В.Д. Мешкова[1], *А.А. Дектерев*[1,2], *К.Ю. Литвинцев*[2]

[1] Сибирский Федеральный Университет, Касноярск, 660041, пр. Свободный, 79
[2] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛОКАЛЬНОГО ТЕПЛООБМЕНА НА МИКРОКЛИМАТ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ

Городская среда формируется путем замены естественной природной поверхности антропогенными элементами, в качестве которых выступают здания и сооружения, а также транспортная инфраструктура. В результате формирования городов происходит создание собственного уникально микроклимата, который может значительно отличаться от микроклимата прилегающих территорий.

Городская среда характеризуется более высокими температурами, так как элементы городской среды созданы из материалов, которые способны удерживать и излучать большое количество антропогенного тепла. Рассматриваемое явление известно, как феномен «городской остров тепла» [1].

Сложившийся микроклимат в городской среде может всячески негативно воздействовать как на здоровье людей, так и на состояние окружающей среды в целом. На формирование микроклимата влияют очень много факторов, начиная с особенностей метеорологических условий территории и географического положения, заканчивая термическими свойствами материалов элементов городской среды и ключевых физических факторов.

На основании выше сказанного возникает необходимость в появлении инструмента, который бы позволил изучить данный феномен и определить степень влияния того или иного фактора/параметра на его образование.

Научным коллектив была реализована математическая модель переноса излучения, состоящая из коротковолнового солнечного излучения и длинноволнового излучения атмосферы и земли, которые при расчете рассматривались независимо друг от друга [2]. Коротковолновое излучение разделяется на прямое и рассеянное (диффузионное):

$$I_{Si} = I_{Si}^{Dir} + I_{Si}^{Dif}$$

Поток диффузионного излучения обусловлен релеевским рассеянием, рассеянием на аэрозолях прямого солнечного излучения и диффузионным отражением поверхностями прямого и рассеянного солнечного излучения. Величина потока солнечного излучения зависела от географических координат, времени года и суток, альбедо и ориентации в

пространстве принимающей поверхности, а также метеоусловий. Численное исследование осуществлялось с помощью адаптированного под данный класс задач программного комплекса SigmaFlow [3].

В качестве модельных задач рассматривались микрорайоны г. Красноярска с вариацией термических свойств среды в зависимости от времени года, а именно изменялось распределение по высоте потенциальной температуры и входящего потока в близи поверхности; значения альбедо поверхности земли в зимний период больше, чем у зданий, в осенний период значения рассматриваемых поверхностей равны, а в летний наоборот.

По результатам проведенных численных исследований было выявлено, что вклад в формировании «городского острова тепла» в зависимости от времени года вносят различные элементы городской среды (стены и крыши зданий, земная поверхность). Наличие солнечного излучения приводит к интенсификации свободно конвективного движения, особенно в приземной области, где увеличение скорости может быть двукратным по сравнению с решением без теплообмена из-за прогрева воздуха более горячими поверхностями земли и зданий. А также в рассматриваемых сценариях наиболее неблагоприятные ситуации формируются в зимний период временя, за счет большой разницы температур.

Список литературы

1. **Manley G.** On the frequency of snowfall in metropolitan England. Q J R Meteorol Soc 1958;84:70–2. http://dx.doi.org/10.1002/qj.49708435910.
2. .**Raithby, G.D., Chui, E.H.** A finite-volume method for predicting a radiant heat transfer enclosures with participating media // J. of Heat Transfer. 1990. Vol. 112. P. 415–423 3.
3. **V.D. Meshkova, A.A. Dekterev, A.A., S.A. Filimonov**. Investigation of the airflow conditions at the city residential areas // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020, V. 1565.

V.D. Meshkova[1], A.A. Dekterev[1,2], K.Yu. Litvintsev[2]

[1] Siberian Federal University,
Kasnoyarsk, 660041, ave. Svobodny, 79
[2] Institute of Thermophysics named after S.S. Kutateladze SB RAS, Novosibirsk,
Novosibirsk, 630090, pr. Academician Lavrentiev,1

STUDY OF THE INFLUENCE OF LOCAL HEAT EXCHANGE ON THE MICROCLIMATE OF THE URBAN ENVIRONMENT

УДК 621.9

В.А. Кузнецов[1,2], *А.А. Дектерев*[1,2]

[1] Сибирский федеральный университет, Красноярск, 660041, пр. Свободный, 79
[2] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630073, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

СОВМЕСТНОЕ СЖИГАНИЕ ВОДОУГОЛЬНОГО И ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В КОТЛЕ С ТАНГЕНЦИАЛЬНОЙ ТОПКОЙ

Угольное топливо является самым неэкологическим энергоносителем. Количество тепловой и электрической энергии, получаемой при сжигании угольного топлива, с каждым годом увеличивается, так как растет потребление. В связи с этим угольная энергетика на данном этапе требует применения инновационных технологий – энергоэффективных, ресурсосберегающих и экологически чистых.

Известно, что при сжигании угля основным негативным воздействием на окружающую среду являются оксиды азота. Применение схемы стадийного дожигания пылеугольного топлива для снижения содержания оксидов азота в уходящих дымовых газах показало положительный эффект [1]. Применение технологии капельного-факельного сжигания водоугольных суспензий на котлах так же показало положительный эффект [2,3].

Учитывая достоинство двух представленных технологий по снижению антропогенных выбросов при сжигании угля, в работе проведены расчётные исследования физико-химических процессов в реальном котле с тангенциальной топкой с использованием схемы дожигания водоугольной суспензии.

В работе математическая модель включает в себя: модель движения многокомпонентной неизотермической газовой среды (несущей фазы) на основе RANS подхода; модель переноса излучения на основе метода дискретных ординат; модель движения капель/частиц на основе подхода Лагранжа; модель горения в газовой фазе на основе гибридной модели, сочетающей механизмы химического реагирования и турбулентного обмена; модель выгорания коксового остатка. Подаваемое в топку распыляемое форсункой водоугольное топливо представляется дискретным набором капель/частиц, которые состоят из комплекса воды и угольных частиц. В модели процесс воспламенения и горения частицы происходит стадийно. Вначале происходит испарение внешней влаги, для описания этого процесса используется модель испарения капли. Для описания выгорания угля используется модель воспламенения и горения угольных частиц. По данной модели происходит прогрев частицы, выход внутренней влаги и летучих компонент топлива, горение

коксового остатка. Летучие компоненты выгорают в газовой фазе. Исследования проведены с использованием универсального CFD пакета Ansys Fluent.

Рассматривается котел типа БКЗ-500-140-1, действующего на Красноярской ГРЭС, с производительностью пара 500 т / ч при давлении P = 140 бар и температуре T = 560 ° C. На рисунке представлены некоторые результаты в виде структуры течения для разных вариантов расчёта. В первом варианте подаётся аэросмесь, во втором варианте ВУС подаётся в виде распылённой дисперсной фазой.

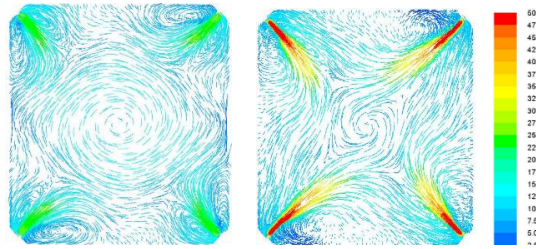


Рис. 1. Линии тока (м/с) в сечении подачи топлива для дожигания.

Численные исследования показали, что реализация системы стадийного дожигания ВУТ позволяет снизить колличество вредных выбрасов NOx относительно базового варинта на 18%.

Список литературы

1. **Chernetskiy, M., Dekterev, A., Chernetskaya, N., & Hanjalić, K.** (2018). Effects of reburning mechanically-activated micronized coal on reduction of NO x : Computational study of a real-scale tangentially-fired boiler. Fuel, 214, 215–229.
2 **Alekseenko, S.V., Kuznetsov, V.A., Mal'tsev, L.I. et al.** Analysis of Combustion of Coal-Water Fuel in Low-Power Hot-Water Boiler via Numerical Modeling and Experiments. J. Engin. Thermophys. 28, 177–189 (2019).
3 **V. Kuznetsov, L. Maltsev, A. Dekterev, M. Chernetskiy.** Numerical investigation of the influence of operating conditions on the formation of nitrogen oxides in the combustion chamber of a low-power boiler during the combustion of coal-water fuel. 2018. J. Phys.: Conf. Ser. 1105 012042.

A.A. Dekterev [1,2], *V.A. Kuznetsov*[1,2]

[1] Siberian Federal University,
Russia 660041 Krasnoyarsk, Svobodny Ave., 79
[2] Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS,
Russia, 630073 Novosibirsk, Lavrentieva Ave., 1

CO-COMBUSTION OF COAL-WATER FUEL AND COAL DUST IN A BOILER WITH A TANGENTIAL FURNER

УДК 536.25

Т.И. Набатчикова[1]

[1] Российский университет транспорта (РУТ(МИИТ)),
Москва, 127994, ул. Образцова, 9 стр.9

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ НА ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ПЕРЕВОЗКИ СКОРОПОРТЯЩИХСЯ ГРУЗОВ

Предельная длительность перевозки позволяет определить максимальный срок нахождения скоропортящихся грузов внутри специализированного транспортного средства (СТС) без нарушения условий их хранения. Для оценки длительности перевозки можно использовать следующее дифференциальное уравнение, записанное для теплового потока направленного внутрь специализированного транспортного средства:

$$(m_г c_г + m_в c_в)\frac{dt_г}{d\tau} = K_{тр} F(t_н - t_г) \qquad (1),$$

где $m_г$ и $m_в$ – массы груза и воздуха в изотермическом транспортном средстве, кг; $c_г$ и $c_в$ – удельные массовые теплоемкости груза и воздуха в изотермическом транспортном средстве, Дж/(кг·К); $t_г$ – температура воздуха и груза в изотермическом транспортном средстве, ^{0}С; $t_н$ – температура наружного воздуха, ^{0}С; τ – время, сек.; $K_{тр}$ – коэффициент теплопередачи ограждающих конструкций изотермического транспортного средства во время перевозки, Вт/(м^{2}К); F – площадь поверхности ограждающих конструкций изотермического транспортного средства, м^2.

После решения уравнения (1) можно получить следующую зависимость для определения максимального срока нахождения скоропортящихся грузов внутри СТС:

$$\tau_{max} = \frac{m_г c_г + m_в c_в}{K_{тр} F} \ln \frac{t_н - t_0}{t_н - t_{max}} \qquad (2)$$

где t_0 – начальная температура груза (после погрузки) ^{0}С.

Помимо градиента температур между кузовом и окружающей средой большое значение имеет коэффициент теплопередачи ($K_{тр}$) кузова СТС. Данный коэффициент регулярно определяется на основании теплотехнических испытаний, которые проводятся для неподвижного транспортного средства, то есть при естественной конвекции. Однако стоит учитывать, что большую часть времени при реальной эксплуатации СТС оно находится в движении. Как известно, коэффициент теплопередачи может быть определен, как

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \qquad (3)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности ограждающей конструкции СТС к воздуху в нём (Вт/м^{2}К); δ_i – толщина ограждающей конструкции (м); λ_i – коэффициент теплопроводности ограждающей конструкции (Вт/м К); α_2 – коэффициент теплоотдачи от окружающей среды к наружной поверхности ограждающей конструкции (Вт/м^{2}К).

Для определения коэффициента теплоотдачи от окружающей среды к наружной поверхности ограждающей конструкции при движении СТС можно использовать следующее уравнение, основанное на критериальной зависимости.

$$\alpha_2 = 0{,}032 \left(\frac{w}{\nu}\right)^{0,8} \frac{\lambda_в}{l^{0,2}} \qquad (4)$$

где w – скорость движения СТС, м/с; l – определяющий размер, в данном случае, длина СТС, м; $\lambda_в$ – коэффициент теплопроводности окружающей среды, Вт(м·К); ν – коэффициент кинематической вязкости, м^2/с.

Для изотермических СТС увеличение скорости движения до 100 км/час приводит к возрастанию значения α_2 до 45 Вт/(м^{2}К). При этом для корректировки $K_{тр}$ по скорости передвижения можно использовать следующую зависимость

$$K_{тр} = \left[\sum_1^n K_{трi} \tau_i\right] \Big/ \tau_{max} \qquad (5),$$

где $K_{трi}$ - коэффициент теплопередачи ограждения изотермического транспортного средства, при его движении со скоростью w_i за время τ_i.

Список литературы

1. **Набатчикова Т.И., Науменко С.Н., Гусев Г.Б.** О влиянии внешних факторов на коэффициент теплопередачи кузова специализированного транспортного средства для перевозки скоропортящихся грузов. Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2020;79(2):88-92.

T.I. Nabatchikova[1]

[1] Russian University of Transport (RUT - MIIT),
Russia, 127994 Moscow, Obrazcova Street, 9b9

IMPACT OF MOVEMENT SPEEDZ ON THE TRANSPORTATION DURATION OF PERISHABLE GOODS

КРУГЛЫЙ СТОЛ

Численные методы в теории тепломассообмена

УДК 621.9

С.А. Исаев[1,5], *С.В. Гувернюк*[2], *Н.И. Михеев*[3], *И.А. Попов*[4], *Д.В. Никущенко*[5]

[1] Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, 196210, Санкт-Петербург, ул. Пилотов, 38
[2] Институт механики МГУ им.М.В.Ломоносова, 119192, Москва, Мичуринский пр., 1
[3] Казанский Научный Центр РАН, 420111, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Лобачевского, 2/31
[4] Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – Казанский авиационный институт 420111, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Карла Маркса, 10
[5] Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3

ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АНОМАЛЬНОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ОТРЫВНОГО ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА В НАКЛОННЫХ ОВАЛЬНО-ТРАНШЕЙНЫХ ЛУНКАХ НА ПЛАСТИНЕ И СТЕНКЕ УЗКОГО КАНАЛА

На стендах в НИИ механики МГУ, КазНЦ РАН и КНИТУ-КАИ экспериментально подтверждена обнаруженная численно аномальная интенсификация отрывного течения и теплообмена в наклонных овально-траншейных лунках (ОТЛ) на пластине и на стенке узкого канала [1-10]. Измеренные перепады статического давления в одиночных ОТЛ при $Re=6.7\times10^4$ и 16.7×10^4, профили скорости ускоряющихся ламинарных ($Re=10^3$) и турбулентных (Re=4300) потоков в узком канале с двумя рядами из 26 ОТЛ, оценка чисел Нуссельта в однорядных ОТЛ на стенке канала хорошо согласуются с численными прогнозами в рамках RANS подхода.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 19-19-00259).

Список литературы

1. **Isaev S.A., Schelchkov A.V., Leontiev A.I., Gortyshov Yu.F., Baranov P.A., Popov I.A.** Tornado-like heat transfer enhancement in the narrow plane-parallel channel with the oval-trench dimple of fixed depth and spot area // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2017. Vol. 109. P. 40—62.
2. **Isaev S.A., Leontiev A.I., Milman O.O., Popov I.A., Sudakov A.G.** Influence of the depth of single-row oval-trench dimples inclined to laminar air flow on heat transfer enhancement in a narrow micro-channel // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 134. P. 338—358.
3. **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.
4. **Исаев С.А., Грицкевич М.С., Леонтьев А.И., Попов И.А., Судаков А.Г.** Аномальная интенсификация турбулентного отрывного течения в наклоненных однорядных овально-траншейных лунках на стенке узкого канала // ТВТ. 2019. Т. 57. № 5. С. 797—800.
5. **Исаев С.А., Грицкевич М.С., Леонтьев А.И., Мильман О.О., Никущенко Д.В.** Ускорение турбулентного потока в узком облуненном канале и интенсификация отрывного течения при уплотнении однорядных наклоненных овально-траншейных лунок на стенке // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26. № 5. 697—702.
6. **Isaev S.A., Gritckevich M.S., Leontiev A.I., Milman O.O., Nikushchenko D.V.** Vortex enhancement of heat transfer and flow in the narrow channel with a dense packing of inclined one-row oval-trench dimples // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 145 (118737). P. 1—13.
7. **Исаев С.А., Мазо А.Б., Никущенко Д.В., Попов И.А., Судаков А.Г.** Влияние на аномальную интенсификацию отрывного турбулентного течения угла наклона однорядных овально-траншейных лунок на стабилизированном гидродинамическом участке узкого канала // ПЖТФ. 2020. Т. 46. Вып. 21. С.18—21.
8. **Исаев С.А., Леонтьев А.И., Мильман О.О., Никущенко Д.В., Попов И.А.** Энергоэффективные поверхности с многорядными наклонными овально-траншейными лунками для воздушных конденсаторов // Энергетика. 2020. № 4. С. 3—10.
9. **Mironov A., Isaev S., Skrypnik A. and Popov I.** Numerical and physical simulation of heat transfer enhancement using oval dimple vortex generators —Review and recommendations // Energies. 2020. Vol. 13. P. 5243.
10. **Миронов А.А., Исаев С.А., Скрыпник А.Н., Попов И.А., Гортышов Ю.Ф.** Физическое моделирование теплогидравлических характеристик каналов с овально-траншейными вихрегенераторами // ТПТ. 2020. Т. 12. № 9. С. 386—402.

S.A. Isaev [1,5], S.V. Guvernyuk [2], N.I. Mikheev [3], I.A. Popov [4], D.V. Nikushchenko [5]

[1] Saint-Petersburg State University of Civil Aviation,
Russia 196210 Saint-Petersburg, Pilots Str., 38
[2] Institute of Mechanics Lomonosov MSU
Russia, 119192, Moscow, Michurinsky pr., 1
[3] Kazan Scientific Center RAS
Russia, 420111, Tatarstan, Kazan, Lobachevsky Str., 2/31
[4] Tupolev Kazan National Research Technical University – Kazan Aviation Institute
Russia, 420111, Tatarstan, Kazan, K.Marks Str., 10
[5] Saint-Petersburg State Marine Technical University,
Russia, 190121 Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 3

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF ABNORMAL ENHANCEMENT OF SEPARATED TURBULENT FLOW AND HEAT TRANSFER IN INCLINED OVAL-TRENCH DIMPLES AT THE PLATE AND THE NARROW CHANNEL WALL

УДК 519.6:533.6.011

Е.В. Колесник, Е.М. Смирнов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29(□)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНОГО ТЕЧЕНИЯ С УГЛОВЫМ ОТРЫВОМ В ТРАНСЗВУКОВОЙ КОМПРЕССОРНОЙ РЕШЕТКЕ

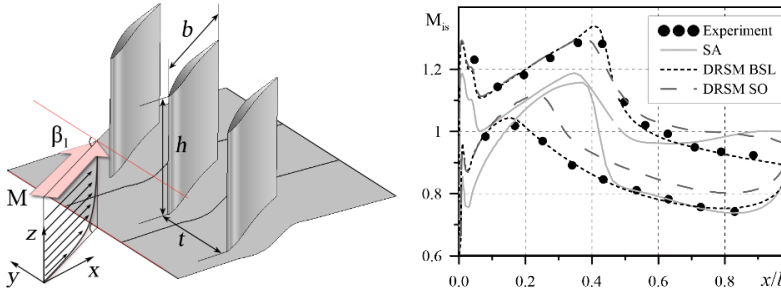
Течение, формирующееся в межлопаточном канале венца осевого компрессора, может характеризоваться наличием углового отрыва в области сопряжения лопатки и торцевой стенки [1-3]. При численном моделировании возникающей в этом случае трехмерной картины течения, особо сложной в случае трансзвукового течения [1, 2], качество расчета определяется как схемными факторами, так и используемым подходом к моделированию турбулентности. Многообещающий потенциал имеют вихреразрешающие методы, однако более экономичный RANS подход долго еще будет оставаться привлекательным в инженерной практике. Вместе с тем представленный в литературе опыт использования различных полуэмпирических RANS моделей турбулентности для расчетов существенно трехмерного течения в трансзвуковых компрессорных решетках весьма ограничен, особенно по части использования моделей рейнольдсовых напряжений.

В настоящей работе излагаются результаты тестовых расчетов течения в прямой трансзвуковой компрессорной решетке, результаты экспериментального исследования которой опубликованы в [1]. Схема течения приведена на рис. 1а, рассматривается режим течения с входным числом Маха 1.092, угол входа составляет 147.1º. В [1] представлены детальные экспериментальные данные о распределении давления по обводу профиля в различных сечениях по высоте решетки и на торцевой поверхности канала ($z = 0$). Цель проведенного расчетного исследования заключалась в определении возможностей ряда полуэмпирических моделей турбулентности по предсказанию структуры и локальных характеристик рассматриваемого течения.

Расчеты выполнены с применением пакета ANSYS Fluent 18.2. Решались осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса, для замыкания использовалось несколько моделей турбулентности, основанных на концепции турбулентной изотропной вязкости (SA, SST k-ω, RNG k-ε), а также две дифференциальные модели рейнольдсовых напряжений (DRSM Stress-omega и DRSM Stress-BSL). Расчеты проводились на сетках размерностью от 0.4 млн до 2.7 млн ячеек.

(•) Е.В. Колесник, kolesnik_ev@mail.ru

В работе анализируется влияние огрубления сетки, которое может приводить к псевдо-улучшению согласованности расчетных характеристик моделируемого течения с экспериментальными данными. Сопоставление результатов, полученных с использованием различных моделей турбулентности, показало, что дифференциальные модели рейнольдсовых напряжений позволяют, в целом, более точно воспроизводить структуру течения вблизи торцевой стенки (рис. 1b), при этом модель DRSM Stress-BSL показывает превосходство.



(a) (b)

Рис. 1. Схема течения (a) и расчетные распределение изоэнтропийного числа Маха по обводу профиля при $z/h = 0.071$ в сопоставление с опытными данными [1] (b)

Список литературы

1. **Weber A. et al** 3-D transonic flow in a compressor cascade with shock- induced corner stall // Trans. ASME. J. Turbomachinery. – 2002. – V. 124. – P. 358–366.
2. **Flaszynski P., Doerffer P.** Shock Wave Boundary Layer Interaction on Suction Side of Compressor Profile in Single Passage Test Section // Journal of Thermal Science. – 2015. – Vol. 24, No. 6. – P. 510-515
3. **Gao F. et al.** Parameter study on numerical simulation of corner separation in LMFA-NACA65 linear compressor cascade // Chinese J. Aeronaut. – 2017 – V. 30, No. 1. – P. 15-30.

E.V. Kolesnik, E.M. Smirnov

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

NUMERICAL SIMULATION OF THREE-DIMENSIONAL FLOW WITH CORNER SEPARATION IN A TRANSONIC COMPRESSOR CASCADE

УДК 621.311.22

Н.А. Абаимов, Г.А. Нестерова, А.Ф. Рыжков

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, 620002, ул. Мира, 19

ВАЛИДАЦИЯ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ДВУХФАЗНОГО ПСЕВДООЖИЖЕННОГО СЛОЯ

Проблема снижения выбросов парниковых газов, в частности CO_2, с течением времени становится всё актуальнее благодаря подписанному Россией Парижскому соглашению по климату и нескольким другим экологическим документам. Комплексный процесс карбонизации основных компонентов зол ТЭС в процессе минерализации выбросов CO_2 позволяет повышать потребительские свойства золошлаков при снижении эмиссии CO_2 на 3-5%, что эквивалентно повышению КПД ТЭС на 1,5-2%. Вовлечение в процесс химического рециклинга региональных ресурсов (золошлаки ТЭС и иных производств, строительные отходы программ реновации жилья и др.) может поднять степень безотходности ТЭС до 70-90% без обращения к дорогостоящим технологиям улавливания и хранения углерода (Carbon capture and storage, CCS). В качестве поглотителей обычно рассматриваются природные ландшафты (леса, моря, торфяники), минералы горных пород (базальты, силикаты) из коры выветривания. К поглотителям также могут быть отнесены различные искусственные материалы и промышленные отходы декорбонизированные в процессе термической обработки и обладающие большей химической активностью, чем природные минералы. Среди них важное место занимают отходы энергетики (золошлаки) и металлургии (шлаки), а также продукты и отходы стройиндустрии.

Существуют различные варианты технического оформления процесса карбонизации золы, одним из самых эффективных из них является двухфазный псевдоожиженный (кипящий) слой [1]. На данный момент этот процесс является недостаточно изученным, поэтому для его исследования предлагается применять современные способы моделирования, например, метод вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics, CFD).

Цель работы - валидация численной CFD-модели псевдоожиженного (кипящего) слоя с использованием литературных экспериментальных данных.

В качестве программы для моделирования выбрана среда для численного CFD-моделирования OpenFOAM, и в частности решатель twophaseEulerFoam. Данный решатель предназначен для моделирования систем, состоящих из одной жидкой (газообразной) сжимаемой фазы и одной дисперсной фазы. Использовалась структурированная

сетка, состоящая из примерно 10 тыс. расчётных элементов (гексаэдров). Экспериментальные данные для валидации взяты из работы [2].

Параметры работы экспериментальной установки [2, 3] и численной модели этой установки: диаметр сферических стеклянных частиц 275 мкм, плотность частиц 2500 кг/м^3, доля частиц в слое 0,6, максимальная доля частиц 0,63, скорость газа на входе в установку 0,46 м/с, частота измерений давления 10 Гц, время проведения замеров 20 с, высота установки датчиков 0,2 м.

Валидация (сравнение экспериментальных данных с расчётными результатами) проводится на примере осреднённого по времени распределения (доли) сферических стеклянных частиц по ширине установки на высоте установки 0,2 м. Результаты CFD-моделирования удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Наблюдается качественное совпадение расчётной и экспериментальной доли частиц в центральной части установки. Максимальные значения доли частиц достигаются около 0,15 м ширины установки. Минимальные же величины расположены симметрично в районе 0,05 и 0,25 м ширины.

Количественное расхождение результатов моделирования с экспериментальными данными незначительно и его можно объяснить рядом допущений, которые были сделаны в используемой модели псевдоожиженного слоя. Среди таких допущений стоит выделить двухмерность моделируемого пространства, а также отказ от использования подмоделей турбулентности.

Список литературы

1. **Reddy K.J., John S., Weber H., Argyle M.D., Bhattacharyya P., Taylor D.T., Christensen M., Foulke T., Fahlsing P.** Simultaneous capture and mineralization of coal combustion flue gas carbon dioxide (CO2) // Energy Procedia. 2011. Vol. 4. P. 1574–1583.
2. **Taghipour F., Ellis N., Wong C.**, Experimental and computational study of gas–solid fluidized bed hydrodynamics // Chemical Engineering Science. 2005. Vol. 60. № 24. P. 6857–6867.
3. **Shi H., Komrakova A., Nikrityuk P.** Fluidized beds modeling: Validation of 2D and 3D simulations against experiments // Powder Technology. 2019. Vol. 343. P. 479-494.

N.A. Abaimov, G.A. Nesterova, A.F. Ryzhkov

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Russia 620002 Ekaterinburg, Mira street, 19

VALIDATION OF A NUMERICAL MODEL OF A TWO-PHASE FLUIDIZED BED

УДК 536.24

А.В. Барсуков[1], *В.В. Терехов*[1], *В.И. Терехов*[1]

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

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТРЫВНОГО ПОТОКА В КАНАЛЕ С ОРЕБРЕНИЕМ МЕТОДОМ RANS И LES

Актуальность исследований сложных турбулентных отрывных течений обусловлена практическими приложениями [1,2]. Действительно, повышение эффективности теплообменного оборудования является одной из важнейших задач современной теплофизики. Особенно актуальными является создание новых методов управления теплообменом в таких течениях. Работа посвящена численному исследованию турбулентного отрывного потока в плоском канале, на который воздействуют дополнительные элементы (вихрегенераторы), имеющие существенно меньшие размеры по сравнению с размерами основного отрывного потока. Наличие таких вихрегенераторов может приводить к значительной перестройке течения и представляется как способ управления параметрами теплоотдачи. В частности, в качестве таких вихрегенераторов могут выступать сплошные ребра [3], табы [4,5]. Предварительные исследования показывают, что благодаря этому возможно существенно интенсифицировать теплоперенос при умеренном росте гидравлических потерь.

В данной работе были получены результаты численного моделирования турублентного течения в плоском канале при наличии вихрегенераторов в виде периодических сплошных ребер. Число Рейнольдса было рассчитано по высоте уступа и среднерасходной скорости, равнялось Re = 12 600. Варьируемыми параметрами было расстояние между ребрами. На всех стенках канала был задан постоянный тепловой поток q = const. На входе и выходе расчетной области было задано периодическое гран условие.

Численное моделирование было выполнено методом RANS. Интегрирование всех уравнений, входящих в математическую модель, проводилось с помощью метода контрольного объема второго порядка точности по пространству в стационарной (итерационной) постановке с использованием решателя cyclicTemperaturePimpleFoam из пакета OpenFOAM. В предварительных двумерых расчетах были выбраны оптимальные сетки, при которых решение перестает зависеть от количества ячеек.

В расчетах с методом крупных вихрей (LES) для замыкания была использована модель Смагоринского. Пространственная дискретизация

имела второй порядок точности (центральная разность). Шаг по время был выбран таким, чтобы во все поле расчета критерий Куранта не превышал 0.5, количество ячеек в вычислительной сетке составило 1.8 млн.

Методами RANS и LES изучено отрывное течение в плоском канале с обратным уступом при наличии и отсутствии поперечного ребра для числа Рейнольдса Re = 12600. Полученные данные позволили проанализировать структуру течения при наличии периодических вихрегенераторов. Показано влияние расстояние между соседними ребрами на теплообмен.

Список литературы

1. Проблемы теплообмена в отрывных течениях/ Терехов В.И.; М.: Издат. Дом Моск. энерг. ин-та , 2006. Т.1. С. 103-111
2. **Eaton J. K., Johnston J. P.** A review of research on subsonic turbulent flow reattachment// AIAA J. 1981. V. 19. P. 1093-1100
3. **Miau J.J., Lee K.C., Chen M.H., Chou J.H.** Control of separated flow by a two-dimensional oscillating fence. AIAA J.1991. V. 29. P.1140.
4. **Дьяченко А.Ю., Жданов В.Л., Смульский Я.И., Терехов В.И.** Экспериментальное исследование теплообмена в отрывной области за обратным уступом при наличии табов // Т и А. 2019. Т. 26. № 4. С. 549-560.
5. **Park H., Jeon W.-P., Choi H., Yoo J.Y.** Mixing enhancement behind a backward-facing step using tabs // Phys. Fluids 2007. V. 19. 105103.

A.V. Barsukov [1], V.V. Terekhov[1], V.I. Terekhov[1]

[1] Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the RAS,
Russia 630090 Novosibirsk, 1, Ac. Lavrentieva ave.

NUMERICAL SIMULATIONS OF A SEPARATED FLOW IN A RIBBED CHANNEL BY THE RANS AND LES METHOD

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 1

ТЕПЛО- И МАССООБМЕН ПРИ ОДНОФАЗНОЙ КОНВЕКЦИИ

Митрофанова О.В. 8
Механизмы аккумуляции энергии крупномасштабными вихреобразованиями

Михеев Н.И., Шакиров Р.Р., Давлетшин И.А. 10
Конвективный теплообмен и турбулентность в условиях динамической неравновесности течения в канале

Митяков А.В., Греков М.А., Гусаков А.А., Сероштанов В.В. 12
Течение и теплообмен вблизи ряда цилиндров

Митяков В.Ю., Сероштанов В.В., Власов А.С., Сучок В.В., Жидков Н.А. 14
Интенсивность пульсаций теплового потока при обтекании кругового цилиндра

Осипов Л.Е., Плотников Л.В., Плотников О.А. 16
Влияние масштаба турбулентности потока на интенсивность теплоотдачи в каналах с разными поперечными сечениями

Панкратов Е.В., Леухин Ю.Л. 18
Исследование влияния сужения кольцевого канала и числа Рейнольдса на формирование вихрей Тейлора–Гёртлера

Руденко Ю.К., Плаксина Ю.Ю., Винниченко Н.А., Пуштаев А.В., Уваров А.В. 20
Сравнительный анализ механизмов конвекции в различных жидкостях в зависимости от расположения источника нагрева

Шакиров Р.Р., Давлетшин И.А., Михеев Н.И. 22
Гидродинамика и конвективный теплообмен в пограничном слое с положительным градиентом давления

Засимова М.А., Иванов Н.Г. 24
Об использовании процедуры коррекции модуля скорости для задач вентиляции

Ковальногов В.Н., Хахалев Ю.А., Хахалева Л.В., Федоров Р.В., Цветова Е.В. 26
Разработка и исследование моделей турбулентного переноса на основе показателя Херста

Митрофанова О.В., Поздеева И.Г., Старовойтов Н.А. 28
Исследование механизма возбуждения резонансных эффектов в сложной гидромеханической системе

Панкратов Е.В., Тетерин Е.А., Леухин Ю.Л. 30
Исследование влияния вихрей Тейлора–Гёртлера на теплоотдачу кольцевого канала

Клюев М.А., Молочников В.М. 32
Структура турбулентного потока за цилиндрическим препятствием в ограниченном боковыми стенками канале

Байрамуков А.Ш., Митрофанова О.В. 34
Исследование вихревой структуры течения рабочих сред в элементах трубопроводов судовых ЯЭУ

Лучинкин Н.А., Разуванов Н.Г., Ямщикова Л.В. 36
Экспериментальное исследование теплообмена при течении жидкого металла в контуре естественной циркуляции

Филиппов М.В., Баранов И.Н. 38
Экспериментальное исследование тепломассообмена кольцевых импактных струй

Киселёв Н.А., Виноградов Ю.А., Здитовец А.Г. 40
Теплообмен и трение при неравновесном положительном градиенте давления

Киселёв Н.А., Хазов Д.Е., Виноградов Ю.А. 42
Трение и теплообмен в канале при течении за цилиндром

Сухановский А.Н., Евграфова А.В. 44
Общие закономерности конвективного теплопереноса для однородных и смешанных граничных условий

Лоенко Д.С., Шеремет М.А. 46
Влияние материала наночастиц и их объемной доли на естественную конвекцию неньютоновской наножидкости в квадратной полости с локальным источником энергии

Шишкина И.А., Колесник Е.В. 48
Влияние численной схемы на результаты расчета двумерного течения в трансзвуковой решетке осевого компрессора

Астанина М.С., Шеремет М.А. 50
Численное моделирование термогравитационной конвекции жидкости переменной вязкости в кубической пористой полости с тепловыделяющим элементом

Михайлов Е.А., Тепляков И.О., Малышев К.Ю., Георгиевская Е.П. 52
Роль нелинейных эффектов при описании электровихревых течений

Миронов И.С., Пятницкая Н.Ю., Лучинкин Н.А., Беляев И.А., Свиридов Е.В. 54
Плоская струя жидкого металла под действием поперечного магнитного поля

Сковородкин Е.А., Веретенников С.В., Евдокимов О.А. 56
Бесконтактное исследование структуры ограниченного закрученного потока

Меньшаков И.А., Веретенников С.В. 58
Исследование спектра акустического излучения вихревой трубы

Попович С.С., Киселёв Н.А., Здитовец А.Г. 60
Экспериментальное исследование влияния продольного градиента давления на адиабатную температуру стенки при обтекании цилиндра сверхзвуковым потоком.

Михайленко С.А., Шеремет М.А. 62
Исследование естественной конвекции в кубической вращающейся полости с дифференциально-обогреваемыми стенками

Шулепова Е.В., Шеремет М.А. 64
Свободная конвекция вязкой жидкости в двусвязной области с периодически тепловыделяющим элементом

Белавина Е.А., Пятницкая Н.Ю. 66
Оценка влияния свободной конвекции в прямоугольной ячейке с внутренними источниками тепловыделения

Белавина Е.А., Ямщикова Л.В., Разуванов Н.Г. 68
Решение задачи конвективного теплообмена в закрученной трубе в кольцевой системе координат

Минко К.Б., Артемов В.И., Макаров М.В., Яньков Г.Г. 70
Влияние свойств твердой стенки на температурные пульсации при турбулентном течении жидкости в круглой трубе

Евдокимов О.А., Гурьянов А.И., Веретенников С.В. 72
Исследование структуры ограниченного противоточного закрученного течения

Лущик В.Г., Макарова М.С. 74
Численное исследование турбулентного пограничного слоя с положительным градиентом давления

Лущик В.Г., Макарова М.С., Решмин А.И. 76
Теплообменник «труба в трубе» с диффузорными каналами

СЕКЦИЯ 2

МЕТАСТАБИЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ И ФЛУКТУАЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Коверда В.П., Скоков В.Н. 80
Случайный процесс с турбулентным спектром мощности

Решетников А.В., Мартынова Л.Э., Игнатюк М.Е., Скоков В.Н., Коверда В.П. 82
Локальное зондирование флуктуаций на проволочном нагревателе при различных режимах кипения

Виноградов В.Е., Павлов П.А. 84
Предельный перегрев водного раствора гидроксида калия при импульсном электролизе

Никитин Е.Д., Попов А.П., Богатищева Н.С., Файзуллин М.З. 86
Теплофизические свойства компонентов биотоплив второго поколения

Проценко С.П., Брюханов В.М., Байдаков В.Г. 88
Вскипание растянутой Леннард-Джонсовской жидкости в канале с твердыми гладкими стенками

Байдаков В.Г., Каверин А.М., Панков А.С. 90
Спонтанное вскипание перегретых растворов гелия и водорода в метане

Перминов С.А., Липнягов Е.В., Паршакова М.А. 92
Влияние микродобавки углекислого газа на кинетику вскипания перегретого *н*-пентана

Лукьянов К.В., Котов А.Н., Старостин А.А., Скрипов П.В. 94
Разработка методики исследования аномалий теплоотдачи в импульсно перегретых углеводородных жидкостях с примесью влаги

Артамонов А.В., Макаров П.Г., Дмитриев А.С. 96
Исследование эффекта Лейденфроста на неоднородных поверхностях сложной структуры

Розанов Е.О., Проценко С.П., Байдаков В.Г. 98
Метадинамическое исследование кристаллизации переохлажденной Леннард-Джонсовской жидкости: выбор коллективных переменных для описания нуклеации

Игольников А.А., Рютин С.Б., Скрипов П.В. 100
Особенности теплообмена в растворах за линией равновесия жидкость-жидкость

Поволоцкий И.И., Волосников Д.В., Скрипов П.В. 102
Теплоотдача к водным растворам с широкой областью несовместимости компонентов.

Бусов К.А. 104
Влияние поперечного воздушного потока на струю перегретой воды

Вяткин А.В., Пискунов М.В., Семёнова А.Е., Хомутов Н.А. 106
Влияние характеристик топливных эмульсий на растекание и разрушение капель при изотермическом ударе о стенку

Котов А.Н., Гурашкин А.Л., Старостин А.А., Скрипов П.В. 108
Локальная активация вскипания перегретой жидкости лазерным импульсом на торце световода

Андбаева В.Н., Хотиенкова М.Н. 110
Теплофизические свойства бинарных систем

Богатищева Н.С., Никитин Е.Д. 112
Использование метода функциональной автомодельности для оценки критических свойств гомологических рядов

Проценко К.Р., Байдаков В.Г. 114
Молекулярно-динамическое моделирование кавитации в растянутой жидкости

Томин А.С., Файзуллин М.З., Виноградов А.В., Коверда В.П., Манаков А.Ю. 116
Исследование кристаллизации в газонасыщенных слоях аморфного льда

Богатищева Н.С., Галкин Д.А. 118
Коэффициенты температуропроводности и теплопроводностии водного раствора монобутилового раствора этиленгликоля

СЕКЦИЯ 3

ТЕПЛО- И МАССООБМЕН В ДВУХФАЗНОЙ И МНОГОФАЗНОЙ СРЕДАХ

Павленко А.Н. 122
Тенденции в развитии методов интенсификации теплообмена и повышения критического теплового потока при кипении

Дмитриев А.С. 124
Нетривиальная капиллярная гидродинамика и сильное испарительное охлаждение в многослойных двумерных материалах: применение в системах термоменеджмента электронных и энергетических устройств

Бабич А.Ю., Зайнуллина Э.Р., Митяков В.Ю., Сапожников С.З. 126
Исследование конденсации водяного пара на внутренней поверхности труб методом градиентной теплометрии

Кропотова С.С., Стрижак П.А., Шлегель Н.Е. 128
Влияние свойств жидкости на режимы и последствия столкновений капель

Попович С.С., Здитовец А.Г., Киселёв Н.А., Виноградов Ю.А. 130
Исследование термогазодинамики сверхзвукового обтекания стенки газокапельным потоком

Федоренко Р.М., Антонов Д.В., Стрижак П.А. 132
Влияние реологических свойств эмульгированных топлив на характеристики вторичных капель при микро-взрывной фрагментации

Гавриш А.С., Герасименко Л.А., Гончар А.С. 134
Конденсация при истечении срока применения водоотталкивающих веществ

Забиров А.Р., Ягов В.В., Лексин М.А. 136
Влияние ПАВ на начало процесса интенсивного охлаждения в недогретой воде

Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Павлов А.В., Бобылев П.Г., Виноградов М.Д. 138
Интенсификация теплообмена при кипении в наножидкости

Храмцов Д.П., Мошин А.А., Некрасов Д.А. 140
Моделирование распределения паровой фазы по сечению канала с зернистой засыпкой при критическом режиме течения

Молотова И.А., Забиров А.Р., Ягов В.В., Антонов Н.Н. 142
Влияние свойств поверхностей высокотемпературных тел на теплообмен при охлаждении в жидкостях

Камалова Р.И., Замалеев М.М., Ковальногов В.Н., Хусаинова Д.Ф. 144
Разработка технологий деаэрации воды уходящими газами котла

Бабенко Д.Д., Дмитриев А.С., Михайлова И.А. 146
О динамических эффектах испарения и кипения капель на неоднородных графеновых подложках для эффективного термоменеджмента энергетических устройств

Андбаева В.Н., Панасенко А.С. 148
Капиллярная постоянная системы пропан-водород-гелий при высоких температурах

Майоров В.О., Ястребов А.К., Левашов В.Ю. 150
Исследование характеристик капель, образующихся вблизи межфазной границы при интенсивном испарении

Панов Г.В., Решетников А.В. 152
Влияние геометрических факторов на распыл струй вскипающей жидкости

Галкин Д.А., Скрипов П.В. 154
Измерение коэффициента теплопроводности водных растворов ППГ-425 и ППГ-725

Аксянов Р.А., Коханова Ю.С., Куимов Е.С., Попов И.А. 156
Исследование кипения различных жидкостей на микроструктурированных поверхностях

Крапивин И.И., Дедов А.В., Беляев А.В. 158
Экспериментальное исследование теплоотдачи при кипении потока жидкости в канале с элементом визуализации

Швецов Д.А., Павленко А.Н., Брестер А.Е., Жуков В.И. 160
Карта режимов испарения и кипения горизонтального слоя жидкости на модифицированной поверхности

Брестер А.Е., Жуков В.И., Швецов Д.А., Павленко А.Н. 162
Спектры мощности пульсаций давления в процессах испарения/кипения жидкости при пониженных давлениях

Ячевский И.А., Королёв П.В. 164
Сопоставление результатов экспериментов по кипению HE-II на цилиндрическом нагревателе внутри пористой структуры

Миськив Н.Б., Серов А.Ф., Назаров А.Д., Мамонов В.Н. 166
Ультразвуковой метод определения объема газа в газожидкостном потоке

Сидоров А.А., Ястребов А.К. 168
Численное исследование объемной конденсации в проточной части ступени турбодетандерного агрегата

Кузнецов Д.В., Павленко А.Н. 170
Особенности теплообмена при кипении азота на капиллярно-пористых покрытиях, полученных методом 3D печати

Старинская Е.М., Миськив Н.Б., Назаров А.Д., Терехов В.В., Терехов В.И. 172
Исследование факторов, влияющих на теплообмен при испарении капель наножидкости

Ступакова А.В., Дедов А.В. 174
Расчет критического теплового потока при кипении в большом объеме на микроструктурированных поверхностях

Малахов И.П., Сердюков В.С., Суртаев А.С. 176
Экспериментальное исследование теплообмена и локальных характеристик кипения на гидрофобной поверхности при субатмосферных давлениях

Тукмаков А.Л., Арсланова С.Н., Тукмакова Н.А. 178
Течение полидисперсной парокапельной смеси в канале сопла Вентури

Сердюков В.С., Суртаев А.С., Малахов И.П., Сафаров А.С. 180
Исследование вскипания недогретой жидкости при импульсном тепловыделении

Ткаченко П.П., Кропотова С.С., Шлегель Н.Е., Стрижак П.А. 182
Характеристики процессов соударений капель воды в высокотемпературной газовой среде

Антонов Д.В., Стрижак П.А. 184
Моделирование процессов микровзрыва в многокомпонентных каплях

Кожухова Е.А., Кожухов Н.Н., Ряжских В.И., Наумов А.М., Нетреба А.В. 186
Моделирование гидродинамики двухфазного потока в неньютоновской жидкости

Роньшин Ф.В., Дементьев Ю.А., Кочкин Д.Ю., Элоян К.С., Вожаков И.С. 188
Исследование формирования пузырей в миниканальных смесителях

СЕКЦИЯ 4

СЛОЖНЫЙ ТЕПЛОМАССООБМЕН И ПОРИСТЫЕ СРЕДЫ

Аттетков А.В., Гайдаенко К.А., Котович А.В. 192
Температурное поле двухфазного пористого материала с поглощающими проникающее излучение включениями в виде шарового слоя

Нигай Н.А., Сыродой С.В. 194
Анализ влияния температуры внешней среды на условия сушки веток лиственных пород древесины

Деревич И.В., Клочков А.К. 196
Моделирование нестационарной функции плотности вероятности параметров частиц в вязкой среде с учетом бимодального потенциала

Кочнев К.В. 198
Моделирование теплообмена в симуляторе лунного реголита

Зинкевич В.П. 200
Механизм влияния сжатия слоев экранно-вакуумной теплоизоляции на плотность теплового потока

Карпухина Т.В., Ковальногов В.Н., Бояркин М.С., Федоров Р.В. 202
Исследование процесса тепломассобмена в капиллярно-пористых телах в приложении к разработке перспективных биотоплив

Головченко М.И., Матвеев Е.Д., Макаров П.Г., Дмитриев А.С. 204
Исследование влияния материала засыпки на эффект "прыгающих пузырей"

Рамазанова Д.Р. 206
Тепловой анализ вращающегося крупногабаритного космического аппарата в форме тора

Алифанов О.М., Ильин В.В., Викулов А.Г., Ненарокомов А.В., Моржухина А.В. 208
Идентификация теплофизических свойств высокотемпературного сверхпроводящего керамического материала

Захаров Н.С., Сулягина О.А., Солнцева Е.В., Мошин А.А., Терещук А.Ю. 210
Исследование процессов переноса в гелевых системах с клетками

Иванов Н.С., Кузма-Кичта Ю.А., Лавриков А.В. 212
Исследование смачивания покрытий с различной структурой

Колчанова Е.А., Колчанов Н.В. 214
Типы виброконвективной неустойчивости в слое жидкость – пористая зона в гравитационном поле

Колчанова Е.А., Колчанов Н.В. 216
Возникновение конвекции примеси в анизотропной пористой среде с учетом иммобилизации

Кожухов Н.Н., Кожухова Е.А., Коновалов Д.А., Прутских Д.А., Перунова В.И. 218
Моделирование теплообмена в элементе с анизотропной пористостью

Коротеева Е.Ю., Шагиянова А.М., Рязанов П.А. 220
Визуализация и измерение гидродинамических параметров течения вблизи твердой стенки методами высокоскоростной термографии

Михеева Г.В. 222
Численное исследование двухтемпературной модели теплопереноса в металлической наноплёнке

Лепешкин А.Р., Вербанов И.С., Ильеня М.Ю., Ильинская О.И. 224
Методика испытаний элементов теплообменников с использованием индукционного нагрева

Гайдукова О.С., Стрижак П.А. 226
Исследование закономерностей процесса зажигания газовых гидратов при кондуктивном теплообмене

Няшина Г.С., Курганкина М.А., Щвец А.С., Ахметшин М.Р. 228
Эффективные условия утилизации биомассы

СЕКЦИЯ 5

ХИМИЧЕСКИЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И ТЕПЛОМАССООБМЕН

Кузнецов В.В. 232
Тепломассообмен при фазовых и химических превращениях в сложных канальных системах энергетического оборудования

Снегирёв А.Ю., Кузнецов Е.А., Маркус Е.С., Заборовский В.С., Мулюха В.А. 234
Формирование, рост и потеря устойчивости диффузионного пламени в невесомости. Космический эксперимент «Фламенко»

Блинов Д.В., Борзенко В.И., Дуников Д.О., Казаков А.Н., Романов И.А. 236
Процессы тепломассообмена в устройствах твердофазного обратимого хранения и очистки водорода

Счастливцев А.И., Борзенко В.И. 238
Особенности термодинамических и тепловых процессов в водородосжигающих установках и системах на их основе

Зеленцов А.А. 240
Особенности 0-1D и 3D моделирования рабочего процесса современного авиационного поршневого двигателя

Пурин М.В., Сыродой С.В., Саломатов В.В. 242
Обоснование возможности утилизации автомобильных шин в составе водоугольных топлив

Кузьмин В.А., Заграй И.А., Шмакова Н.А. 244
Разработка информационной системы определения оптимальных температурных режимов работы котлов при сжигании твердых топлив

Кавтарадзе Р.З., Зеленцов А.А., Касько А.А. 246
Верификация модели рабочего процесса авиационного роторно-поршневого двигателя

Железнов А.П., Крылов В.С., Брдынкевич Д.В. 248
Воспламенение смеси газов в сосуде замкнутого объема в условиях вакуума

Моисеева К.М., Крайнов А.Ю., Порязов В.А. 250
Математическое моделирование процессов теплообмена при горении металлизированного смесевого твердого топлива

Ло Т., Чирков А.Ю. 252
Расчёт термодинамических свойств смесей в двухфазном равновесии

Handawy Mo., Снегирёв А.Ю. 254
Влияние катализаторов на термическое разложение полимеров в кислородном микрокалориметре

Клюев А.Ю., Гурьянов А.И. 256
Исследование влияния масштабного фактора на горение метано-воздушных диффузионных и перемешанных струй

Чухин Н.И., Счастливцев А.И. 258
Экспериментальные исследования процессов в газогенераторе водородо-воздушной системы аккумулирования энергии

Блинов Д.В., Борзенко В.И., Бездудный А.В. 260
Экспериментальные исследования процессов в металлогидридном реакторе хранения тепловой энергии

СЕКЦИЯ 6

ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ ТЕПЛОМАССООБМЕНА: ИНТЕНСИФИКАЦИЯ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Пономарев К.О. 264
Экспериментальное исследование влияния модификации внутренних поверхностей крышек термосифона на распределения температуры по высоте устройства

Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В., Бабич А.Ю., Зайнуллина Э.Р. 266
Интенсификация теплообмена при конденсации водяного пара на наклонной трубе

Алексеев П.Д., Леухин Ю.Л. 268
Исследование аэродинамики и теплоотдачи струйного модульного рекуператора

Пономарев А.В., Пелевин Ф.В. 270
Моделирование температурного состояния камеры ЖРД с межканальным движением теплоносителя сквозь металлический сетчатый материал

Картуесова А.Ю., Птахин А.В., Крылов В.С. 272
Расчетно-экспериментальные исследования работы вакуумного конденсатора в условиях неравномерного охлаждения

Милосердов В.О., Корлякова М.О. 274
Построение предиктивной модели парогенератора экспериментального стенда на базе органического цикла Ренкина

Чукалин А.В., Ковальногов В.Н., Федоров Р.В., Бондаренко А.А. 276
Исследование возможностей и условий повышения эффективности тепловой защиты газотурбинного двигателя

Малеваный М.В., Коновалов Д.А. 278
Современные подходы к интенсификации тепло- и массообмена в разнотемпературных конденсационных фильтрах

Кондратьев А.В., Крылов В.С., Птахин А.В., Железнов А.П. 280
Особенности измерений при промышленных испытаниях мокрых вентиляторных градирен

Кузьмин В.А., Адеков А.Л., Десятков И.А. 282
Проблемы эффективности котельных установок малой теплоэнергетики в Кировской области

Митрофанова О.В., Федоринов А.В. 284
Моделирование гидродинамики и теплообмена в сложных каналах парогенерирующих систем судовых ЯЭУ

Кропотова С.С., Стрижак П.А., Шлегель Н.Е. 286
Комбинированные системы вторичного измельчения капель жидкостей

Крылов В.С., Картуесова А.Ю., Птахин А.В. 288
Расчетно-экспериментальные исследования работы высокоэффективного конденсатора пара из парогазовой смеси

Сухановский А.Н., Евграфова А.В. 290
Исследование влияния многомасштабного рельефа поверхности на теплообмен

Замалеев М.М., Яковлев А.А., Абрамов А.В., Федоров Р.В., Хусаинова Д.Ф. 292
Повышение эффективности ТЭЦ за счет внедрения в ее цикл оборудования для переработки отходов

Коноплев М.И., Онохин Д.А., Карпов С.В. 294
Аэродинамика и конвективный теплообмен в циклонных рециркуляционных устройствах

Птахин А.В., Мильман О.О. 296
Переменные режимы работы воздушных конденсаторов - корректировка методики расчета

Черныш Д.Ю., Ямщикова Л.В., Беляев И.А. 298
Экспериментальное исследование влияния устройств закрутки на поток жидкого металла в магнитном поле

Носкова К.Р., Гурьянов А.И., Гурьянова М.М. 300
Газодинамика камеры сгорания ГТД в условиях несимметричного течения на вход

Виноградов Д.А., Исмаилов А.И. 302
О технологических приложениях парового взрыва и тонкой фрагментации расплава

Веселов К.Е., Пиралишвили Ш.А., Веретенников С.В. 304
Исследование влияния геометрии закручивающих устройств на эффект энергоразделения в вихревой трубе

Молотов И.М., Счастливцев А.И., Борзенко В.И., Ямщикова Л.В. 306
Разработка автоматизированной системы для экспериментального исследования тепловых процессов в водородно-кислородном парогенераторе

Ван Юпен, Дедов А.В. 308
Моделирование процесса теплообмена в гипервапотроне для первой стенки ИТЭР.

Старинский С.В., Шухов Ю.Г., Булгаков А.В. 310
Влияние метода получения пленок серебра на эффективность их использования для SERS

Платонов Д.В., Минаков А.В., Сентябов А.В. 312
Численное исследование гидротурбин с переменной частотой вращения с целью расширения эффективного диапазона работы

Грабовский И.И., Гурьянов А.И. 314
Изучение особенностей проектирования теплообменного аппарата для катушки постоянного электромагнита магниторезонансного плазменного двигателя

Карпов П.Н. 316
Широкопоточная импактная система охлаждения на основе многоструйного двухфазного воздушно-капельного источника

Лепешкин А.Р., Ильеня М.Ю., Ильинская О.И. 318
Повышение эффективности работы ВСУ

Масленников Г.Е., Лазебный И.П., Назарова В.В., Рыжков А.Ф. 320
ПГУ Уральского региона с системой карбонизации для улавливания CO_2

Хлоповских Е.Е., Тычинина А.А., Винокурова И.М., Болдырев А.А., Сафонова Л.Б. 322
Изучение изменения гидродинамических условий в электрохимических системах

Тычинина А.А., Хлоповских Е.Е., Винокурова И.М., Болдырев А.А. 324
Определение температурных полей в условиях электрохимических технологий

Тычинина А.А., Хлоповских Е.Е., Винокурова И.М., Болдырев А.А. 326
Термодинамический анализ электролитов в электрохимических технологиях

Коченов А.М., Лепешкин А.Р., Ильинская О.И. 328
Разработка насоса для повышения эффективности подачи топлива в систему авиационного газотурбинного двигателя

Божеева Д.М, Дектерев Ар.А., Дектерев А.А. 330
Расчетное исследование аэродинамики колеблющегося крылового профиля

Мешкова В.Д., Дектерев А.А., Литвинцев К.Ю. 332
Исследование влияния локального теплообмена на микроклимат городской среды

Кузнецов В.А., Дектерев А.А. 334
Совместное сжигание водоугольного и пылеугольного топлива в котле с тангенциальной топкой

Набатчикова Т.И. 336
Влияние скорости движения на длительность перевозки скоропортящихся грузов

КРУГЛЫЙ СТОЛ

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ В ТЕОРИИ ТЕПЛОМАССООБМЕНА

Исаев С.А., Гувернюк С.В., Михеев Н.И., Попов И.А., Никущенко Д.В. 340
Численное и экспериментальное исследование аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена в наклонных овально-траншейных лунках на пластине и стенке узкого канала

Колесник Е.В., Смирнов Е.М. 342
Численное моделирование трехмерного течения с угловым отрывом в трансзвуковой компрессорной решетке

Абаимов Н.А., Нестерова Г.А., Рыжков А.Ф. 344
Валидация численной модели двухфазного псевдоожиженного слоя

Барсуков А.В., Терехов В.В., Терехов В.И. 346
Численное моделирование отрывного потока в канале с оребрением методом RANS и LES

Научное издание

**ПРОБЛЕМЫ ГАЗОДИНАМИКИ
И ТЕПЛОМАССООБМЕНА
В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ**

Тезисы докладов XXIII Школы-семинара
молодых ученых и специалистов
под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева

Подписано в печать 07.05.2021.
Формат бумаги 60×84 1/16. Гарнитура Times New Roman.
Бумага офсетная. Печать плоская.
Усл. печ. л. 19,65. Заказ 13751. Тираж 180 экз.

Отпечатано в ООО Универсальная Типография «Альфа Принт»
620049, г. Екатеринбург, переулок Автоматики, 2ж
Тел.: 8 (800) 300-16-00
www.alfaprint24.ru