XL СИБИРСКИЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ СЕМИНАР

посвященный 110-летию со дня
рождения С.С. Кутателадзе
и 300-летию Российской академии наук

20 - 23 августа 2024, Новосибирск

СБОРНИК ТЕЗИСОВ ДОКЛАДОВ

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

XL СИБИРСКИЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ СЕМИНАР,

посвященный 110-летию со дня рождения С.С. Кутателадзе и 300-летию Российской академии наук

20 – 23 августа 2024 г.

Новосибирск, Россия

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Новосибирск, 2024

УДК 532:533:534:535:536:537

Сборник содержит доклады Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодых учёных "XL Сибирский теплофизический семинар", посвященной 110-летию со дня рождения С.С. Кутателадзе и 300-летию Российской академии наук, которая проводилась 20–23 августа 2024 года в Новосибирске. В сборнике представлены доклады по направлениям:

- «Гидродинамика, тепломассообмен и волновые процессы в многофазных средах»,
- «Тепломассообмен при фазовых превращениях»,
- «Конвективные течения в однофазных средах»,
- «Методы управления турбулентностью и интенсификация тепломассопереноса»,
- «Процессы переноса при физико-химических превращениях, включая горение»,
- «Процессы в разреженных газах и плазме»,
- «Теплофизика микро- и наносистем»,
- «Теплофизические свойства веществ и лучистый теплообмен»,
- «Теплофизические проблемы энергетики, энергоэффективность и энергосбережение»,
- «Тепломассоперенос в технологических процессах, решение экологических проблем, низкоуглеродная энергетика»,
- «Прикладное машинное обучение в теплофизике и энергетике»,
- «Материаловедение в задачах теплофизики и энергетики».

В рамках конференции также состоится круглый стол «Многофазные прецизионные технологии» и специальная секция, посвященная юбилею В.И. Терехова.

Мероприятие проводится при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской федерации в рамках Соглашения № 075-15-2024-620 и группы компаний «Научные приборы и системы».

ISBN 978-5-89017-087-3

© Институт теплофизики СО РАН, 2024

Председатель
Маркович Д.М., академик РАН

Учёные секретари
Сердюков В.С., к.ф.-м.н.
Роньшин Ф.В., к.ф.-м.н.

Заместители председателя
Павленко А.Н., чл.-корр. РАН
Сиковский Д.Ф., к.ф.-м.н.

Технический комитет
Пещенюк Ю.А.
Миськив Н.Б., к.т.н.
Лукьянов Ал.А.
Зубова С.В., ООО «Научный Сервис»

Организационный комитет

Батаев А.А., д.т.н.
Бердников В.С., д.ф.-м.н.
Дулин В.М., д.ф.-м.н., проф. РАН
Елистратов С.Л., д.т.н.
Ерманюк Е.В., д.ф.-м.н.
Зайцев Д.В., к.ф.-м.н.
Кабов О.А., д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН
Кашинский О.Н., д.ф.-м.н.
Козлов В.В., д.ф.-м.н.
Краус Е. И., д.ф.-м.н.
Кузнецов В.В., д.ф.-м.н.
Лукашов В.В., к.т.н.
Макаров М.С., к.ф.-м.н.
Марчук И.В., д.ф.-м.н., проф. РАН
Морозов А.А., д.ф.-м.н.
Мулляджанов Р.И., д.ф.-м.н.
Назаров А.Д., д.т.н.
Наумов И.В., д.т.н., проф. РАН
Низовцев М.И., д.т.н.
Новопашин С.А., д.ф.-м.н.
Пармон В.Н., д.х.н., академик РАН
Пахомов М.А., д.ф.-м.н., проф. РАН
Печеркин Н.И., д.т.н.
Прибатурин Н.А., чл.-корр. РАН
Смовж Д.В., д.ф.-м.н.
Станкус С.В., д.ф.-м.н.
Суртаев А.С., к.ф.-м.н.
Терехов В.В., д.ф.-м.н., проф. РАН
Терехов В.И., д.т.н.
Тупикин А.В., д.ф.-м.н.
Федорук М.П., академик РАН
Федяева О.Н., д.х.н., проф. РАН
Чеверда В.В., к.ф.-м.н.
Чернов А.А., д.ф.-м.н., проф. РАН
Чиннов Е.А., д.ф.-м.н.
Шарыпов О.В., д.ф.-м.н.
Шторк С.И., д.ф.-м.н.
Ярыгин В.Н., д.т.н.

Программный комитет

Председатель
Алексеенко С.В., академик РАН
Алифанов О.М., академик РАН
Байдаков В.Г., д.ф.-м.н.
Большов Л.А., академик РАН
Бондарь Е.А., к.ф.-м.н.
Вараксин А.Ю., чл.-корр. РАН
Васильев А.А., д.ф.-м.н.
Васильев Л.Л., д.т.н.
Гешев П.И., д.ф.-м.н.
Гогонин И.И., д.т.н.
Головин С.В., д.ф.-м.н., проф. РАН
Гортышов Ю.Ф., академик АН РТ
Горячева И.Г., академик РАН
Губайдуллин Д.А., чл.-корр. РАН
Дедов А.В., чл.-корр. РАН
Драгунов Ю.Г., академик РАН
Егоров И.В., член-корр. РАН
Запрягаев В.И., д.т.н.
Исаев С.А., д.ф.-м.н.
Кедринский В.К., д.ф.-м.н.
Клименко А.В., академик РАН
Коверда В.П., чл.-корр. РАН
Коротеев А.А., академик РАН
Крюков А.П., д.т.н.
Кузма-Кичта Ю.А., д.т.н.
Кузнецов Г.В., д.ф.-м.н.
Левин А.А., к.т.н.
Левин В.А., академик РАН
Любимова Т.П., д.ф.-м.н.
Матвеенко В.П., академик РАН
Мацкевич Н.И., д.х.н.
Майданик Ю.Ф., д.т.н.
Мессерле В.Е., д.т.н.
Мильман О.О., д.т.н.
Минаев С.С., д.ф.-м.н.
Михеев Н.И., д.т.н.
Нигматулин Р.И., академик РАН
Пенязьков О.Г., академик НАНБ
Петреня Ю.К., чл.-корр. РАН
Петров О.Ф., академик РАН
Покусаев Б.Г., чл.-корр. РАН
Попов И.А., д.т.н.
Предтеченский М.Р., академик РАН
Пухначев В.В., чл.-корр. РАН
Ребров А.К., академик РАН
Рогалёв Н.Д., д.т.н.
Рудяк В.Я., д.ф.-м.н.
Сапожников С.З., д.т.н.
Скрипов П.В., д.ф.-м.н.
Смирнов Е.М., д.ф.-м.н.
Стрижак П.А., д.ф.-м.н.
Стенников В.А., академик РАН
Суржиков С.Т., академик РАН
Тестоедов Н.А., академик РАН
Фёдоров М.П., академик РАН
Филиппов С.П., академик РАН
Фомин В.М., академик РАН
Хомич В.Ю., академик РАН
Шеремет М.А., д.ф.-м.н.
Шмотин Ю.Н., д.т.н.
Яворский Н.И., д.ф.-м.н.
Ягов В.В., д.т.н.
Якуш С.Е., чл.-корр. РАН
Koşar A., Prof.
Hanjalić K., Prof.
Jiang P.-X., Prof.
Lei M.K., Prof.
Lipiński W., Prof.
Rao Yu., Prof
Sazhin S.S., Prof
Wang Q., Prof

Издание сборника докладов производилось с авторских листов участников конференции.
За ошибки и опечатки авторов издательство ответственности не несёт.

ISBN 978-5-89017-087-3
© Институт теплофизики СО РАН, 2024

Секция 1 Гидродинамика, тепломассообмен и волновые процессы в многофазных средах

УДК 532.528; 532.529

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПРОЦЕССА ИСТЕЧЕНИЯ ГАЗА В ЗАПОЛНЕННУЮ ЖИДКОСТЬЮ ОТКРЫТУЮ ОБЛАСТЬ С ТРУБЧАТОЙ РЕШЕТКОЙ

Алексеев М.В., Лежнин С.И.

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

Целью настоящей работы является детальное изучение нестационарного процесса инжекции газа (воздуха) в частично заполненную жидкостью (вода или свинец) открытую трубную область при наличии трубы внутри «шахматной» решетки из трубок.

Ранее в работах авторов было проведено моделирование истечения газа при высоком давлении в открытую трубную область, в осесимметричной двумерной постановке: а) когда в объеме жидкости находились преграды в виде кольцевых каналов [1]; б) когда преграда в виде диска находилась на различных расстояниях от сопла [2]. Было получено, что для разных жидкостей с сильно различающимися плотностями (вода, жидкий свинец) реализуется разные сценарии истечения газа. Показано что для кольцевой сборки [1] газ истекает в виде кольцевой газовой каверны. Наличие дисковой преграды [2] внутри объёма в жидкости приводит к образованию газовой каверны между диском и соплом, которая начинает дробится за преградой. Наличие внутри области решетки из трубок делает расчетную задачу более актуальной для моделирования поведения двухфазной смеси в различных технических, в частности, энергетических устройствах. Трубные решетки могут существенно изменить процесс истечения газа в жидкость, Очень важно знать, не окажется ли силовое воздействие на элементы конструкции запроектным.

В настоящей работе была решена модельная двумерная задача истечения воздуха в трубу заполненной жидкостью (жидкий свинец, вода) в пакете OpenFOAM [3]. Трубный участок имел внутренний диаметр 0.2 м и высоту 0.5 м. Уровень жидкости устанавливался на высоте 0.4 м. Верхняя часть трубы заполнялась воздухом. На верхнем торце ставилось граничное условие свободного втекания-вытекания. Начальное давление в рабочей области было 2 МПа. Внизу рабочего участка был патрубок диаметром 0.02 м, из которого подавался воздух с давлением 18 МПа. Начальная температура воздуха и жидкого свинца равнялась 650 К. Внутри объема устанавливалась трубная шахматная решетка с внешнем диаметром трубы 0.02 м. Расстояние между слоями решетки и между трубами в слое равнялось внешнему диаметру трубы.

На рисунке 1 и 2 представлено распределение объемной доли жидкости и линии тока в разные моменты времени для воды и для жидкого свинца соответственно. Было замечено, что в случае с водой скорость истечения газа выше. Трубная решетка дробит газовый пузырь так, что течение при инжекции в воду и жидкий свинец становится схожим. Ранее было показано что при отсутствии трубной решетки истечение газа в воду происходит в виде газовой струи, а истечение в жидкий свинец в виде газовой каверны около дна объёма.

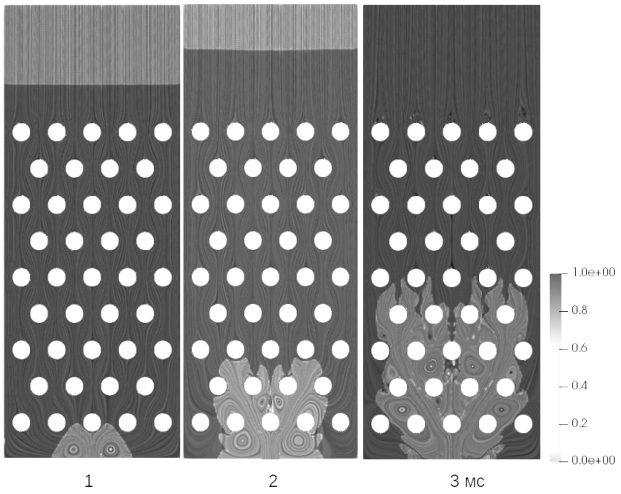


Рисунок 1. Распределение объёмного содержания воды и линии тока в моменты времени 1, 2, 3 мс.

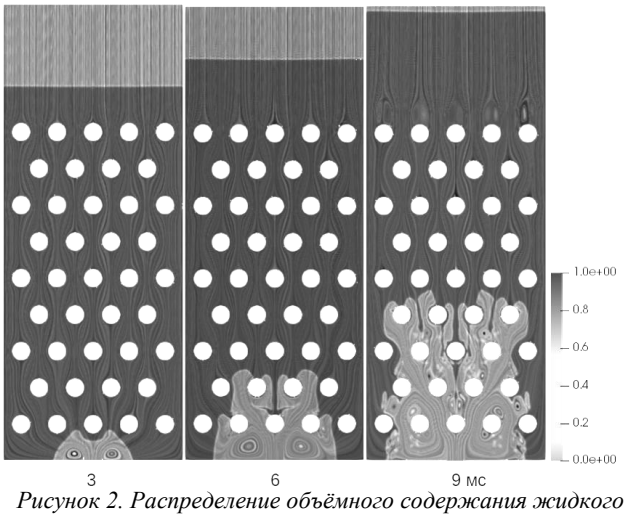


Рисунок 2. Распределение объёмного содержания жидкого свинца и линии тока в моменты времени 3, 6, 9 мс.

Работа поддержана государственным контрактом Российской Федерации с Институтом Теплофизики СО РАН (121032200034-4).

Список литературы:

1. Alekseev M. V., Lezhnin S. I. Simulation of an unstationary process of gas outflow into an open pipe area with a ring assembly filled with a liquid //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Т. 2057. – №. 1. – С. 012038.
2. Vozhakov I. S., Lezhnin S. I. Numerical simulation of the process of gas outflow into an open pipe with an obstacle filled with a liquid (water, lead) //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Т. 2057. – №. 1. – С. 012073.
3. https://openfoam.org

УДК 532.528; 532.529

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕПОДВИЖНОГО ГАЗОВОГО СНАРЯДА ТЕЙЛОРА В ДВУХМЕРНОМ, ОСЕСИММЕТРИЧНОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

Алексеев М.В., Лукьянов Ан.А.

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

В работе [1] проведено численное моделирование стационарного газового снаряда Тейлора с помощью открытого кода OpenFOAM [3]. Исследование выполнено в трехмерной постановке с использованием метода VOF с применением нестационарной модели турбулентности k–ω SST. Условия расчёта повторяли экспериментальную работу [2]. В работе исследовался неподвижный газовый снаряд Тейлора в вертикальной трубе при опускном потоке жидкости. С помощью установки зонда - трубки на оси симметрии был получен стабилизированный, «висячий» - неподвижный снаряд Тейлора для диаметра трубы 20 мм. Был выявлен факт «прилипания» неподвижного снаряда Тейлора к зонду даже при скоростях отпускного потока выше, чем при значении скорости всплытия одиночного снаряда 0.15 м/с. Трехмерный расчёт неподвижного газового снаряда выявил квази-осесимметричную его форму. Таким образом, появилась задача расчёта неподвижного снаряда в двухмерной, осесиметричной постановке для уменьшения численных затрат и детализации межфазной границы.

На рисунке 1 схематично представлена расчетная область применительно к двумерной, осесиметричной постановке задачи на трехмерном решателе кода OpenFOAM. Рабочая область представляет собой клин с малым углом, где на боковых поверхностях устанавливаются условия симметрии, на торцах задаются входные и выходные условия (inlet, outlet), условия типа стенки (wall), ось симметрии (axis). Можно заметить, что по оси z количество ячеек равно Nz=1. Если для однофазных задач данная методика применима, то для двухфазных VOF задач возникнет методический просчёт. На рисунке 2 схематически представлена результирующая сила поверхностного натяжения, которая состоит из силы вычисленной из радиусов кривизны межфазной поверхности в радиальном Rr и продольном Rx направлениях. Если радиус кривизны в продольном направлении Rx можно вычислить, так как Nx, Ny > 3 (минимальное условие вычисление градиента), то радиус кривизны в радиальном направлении Rr вычисляться не будет и будет близок к бесконечности. Поэтому был создан решатель на базе стандартного решателя *compressibleInterFoam* с вычислением радиуса кривизны в радиальном направлении из условия осесимметрии. На рисунке 3 представлен профиль газового снаряда без учета радиальной силы (рис. 3.1). В данном случае носик снаряда острый, донышко снаряда неустойчиво. При учете радиальной силы (рис. 3.2) донышко становится устойчивым, носик снаряда становится более сферическим. На рисунке 3.3 и 3.4 представлено качественное сравнение профиля газового снаряда, полученного в трехмерном расчете и в эксперименте с профилями газового снаряда (рис. 3.2, 3.1) полученными в осесимметричной, двухмерной постановке.

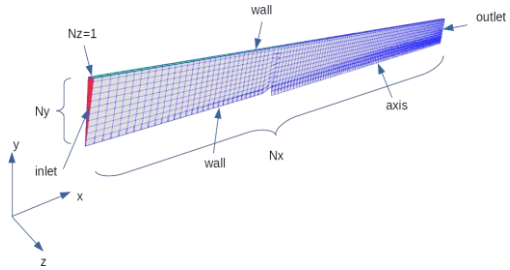


Рисунок 1. Схема расчетной области для решения задач в осесиметричной, двухмерной постановке применительно к трехмерным решателям OpenFOAM

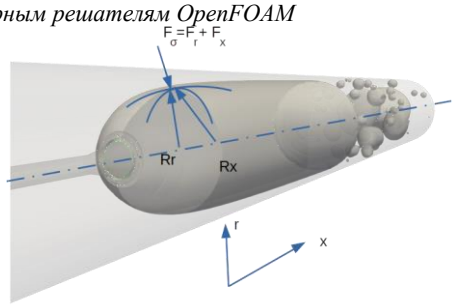


Рисунок 2. Схема расчета результирующей силы поверхностного натяжения в снаряде

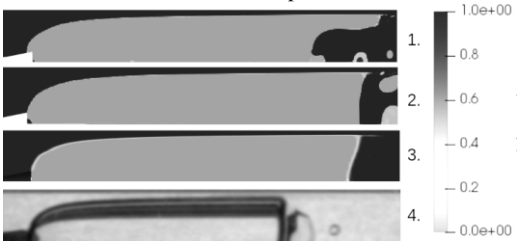


Рисунок 3. Распределние объёмного содержания жидкости в продольном сечении (1-3) и фото газового снаряда [2] (4): 1 – 2D расчет без учета радиальной силы повехостного натяжния, 2 – 2D расчет с учетом радиальной силы поверхостного натяжния, 3 – 3D расчет[1].

Работа поддержана государственным контрактом Российской Федерации с Институтом Теплофизики СО РАН (121032200034-4).

Список литературы:

1. Алексеев М.В., Лукьянов Ан.А., Численное моделирование неподвижного газового снаряда Тейлора // Теплофизика и аэромеханика, 2023, том 30, № 2, С. 293–307.
2. Кашинский О.Н., Курдюмов А.С., Лобанов П.Д., Трение на стенке при обтекании стационарного газового снаряда опусным потоком жидкости // Теплофизика и аэромеханика, 2008, том 15, № 1, С. 93–98.
3. https://openfoam.org

УДК 532.5

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПАРООБРАЗОВАНИЯ И ВТОРИЧНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ КАПЕЛЬ С ЦЕЛЬЮ ПОДАВЛЕНИЯ ГОРЕНИЯ

Антонов Д.В.[1], Стрижак П.А.[1]

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

Системы пожаротушения с использованием тонкораспыленной воды являются наиболее доступными и распространёнными для локализации и подавления крупных природных и техногенных пожаров [1, 2]. Интенсификация процессов пожаротушения является важной и актуальной задачей с точки зрения снижения масштабов необратимого выгорания лесных массивов, зданий и помещений [3]. Однако не в полной мере исследованы условия и альтернативные способы интенсификации процессов парообразования и вторичного измельчения тонкораспыленной воды в пламенной зоне горения для подавления химического реагирования. В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований по интенсификации парообразования и вторичного измельчения тонкораспыленной воды с добавками растительных масел с целью подавления горения. Опыты по прогреву, испарению и микровзрывной фрагментации капель воды с добавками растительных масел (подсолнечном, рапсовом и талловом) проводились в пламенной зоне спиртовой горелки. Типичные видеокадры, полученные при проведении экспериментов представлены на рис. 1.

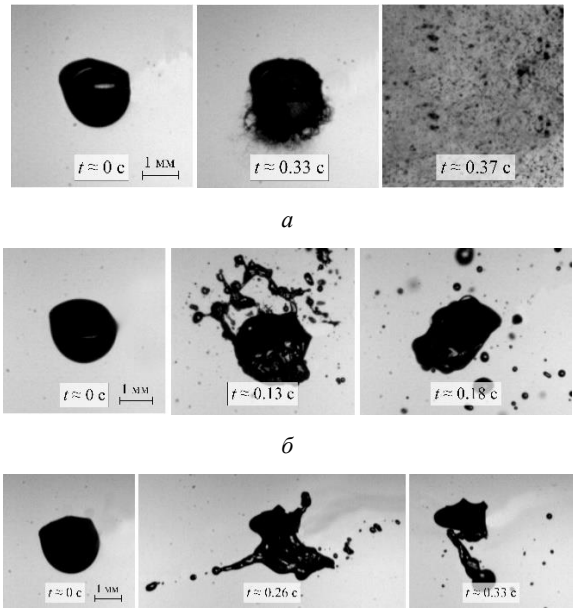


Рис. 1. Типичные видеокадры, полученные при проведении экспериментов в пламенной зоне горения ($T_{flame} \approx 1450$ К) с двухжидкостными каплями ($R_{d0} \approx 0.85 \pm 0.05$ мм, $\eta \approx 10 \pm 2\%$) с добавками растительных масел: (а) – рапсовое масло, (б) – подсолнечное масло, (в) – талловое масло.

Выполнена математическая обработка результатов опытов с целью получения аппроксимационных выражений для установленных экспериментальных зависимостей времен задержки микровзрывного распада, времен существования и нормализованной площади поверхности испарения после распада. Разработана физическая модель парообразования и вторичного измельчения огнетушащих жидкостей с добавками растительных масел в пламени (рис. 2).

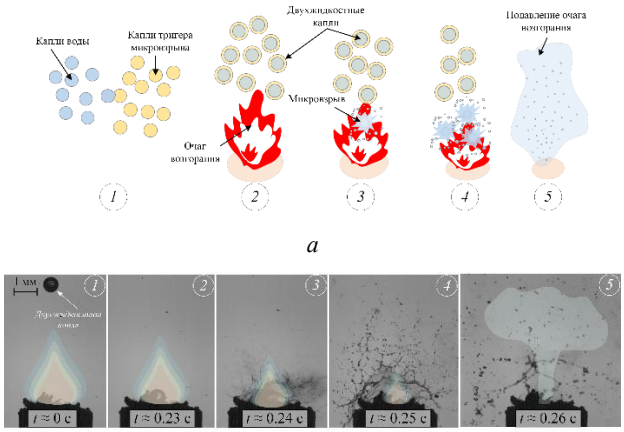


Рис. 2. Физическая модель эффектов микровзрывной фрагментации (а) и видеокадры подавления очага возгорания методом генерации двухжидкостных капель с демонстраций стадий (б): 1 – подготовка огнетушащего состава; 2 – движение фронта огнетушащего вещества; 3 – достижение критических условий микровзрывного распада; 4 – прогрев, испарение и каскадное доизмельчение двухжидкостных капель; 5 – формирование парового буферного слоя с последующей изоляцией и ликвидацией очага возгорания.

Сформулированы практические рекомендации для обеспечения условий интенсивного дробления огнетушащих жидкостей с добавками растительных масел с целью интенсификации подавления горения. Установленные закономерности микровзрывной фрагментации двухжидкостных капель являются альтернативой способам тушения крупных техногенных и природных пожаров с использованием капсул с водой в активной оболочке, взрываемых снарядов и криогенных технологий.

Список литературы:

1. Abdulrahman S.A., Chetehouna K., Cablé A., Skreiberg Ø., Kadoche M. A Review on Fire Suppression by Fire Sprinklers // J. Fire Sci. 2021. V. 39. P. 512-551.
2. Hua J., Kumar K., Khoo B.C., Xue H. A Numerical Study of the Interaction of Water Spray with a Fire Plume // Fire Saf. J. 2002. V. 37. P. 631-657.
3. Grant G., Brenton J., Drysdale D. Fire Suppression by Water Sprays // Prog. Energy Combust. Sci. 2000. V. 26. P. 79-130.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда
(РНФ 21-71-10008, https://rscf.ru/project/21-71-10008/)

УДК 532.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ДВУХ НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ ВНУТРИ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ФОРСУНКИ

Апостол Ю.С.[1,2], Вожаков И.С.[1], Хребтов М.Ю.[1], Мулляджанов Р.И.[1]

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

[2] Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Оптимизация процесса распыла жидкости – важная и актуальная задача во многих отраслях, поскольку позволяет повысить эффективность. Так, добавление в топливо небольшого количества воды позволяет добиться повышения эффективности впрыска топлива. В данной работе проведено численное моделирование течения двух несмешивающихся жидкостей внутри форсунки центробежного типа.

Моделирование проведено путем численного решения уравнений Навье-Стокса (1)-(3), имплементированных в код Basilisk. Аппроксимация межфазных границ проводилась с использованием метода объема жидкости (Volume of fluid). Модель турбулентности, используемая в расчетах – LES (Large Eddy Simulation).

$$\frac{\partial \alpha_m}{\partial t} + u_j \frac{\partial \alpha_m}{x_j} = 0; \qquad m = 1,2 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_k}{\partial x_k} = 0; \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\tau_{ij} + \tau_{tij}\right) + f_\sigma; \quad (3)$$

где u_k, x_k – компоненты скоростей и координат, α_m – фаза, t – время, p – давление, $\rho = \alpha_1\rho_1 + \alpha_2\rho_2 + (1 - \alpha_1 - \alpha_2)\rho_3$ – плотность, $\mu = \alpha_1\mu_1 + \alpha_2\mu_2 + (1 - \alpha_1 - \alpha_2)\mu_3$ – динамическая вязкость, $\tau_{ij} = \mu(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})$ – тензор вязких напряжений, $\tau_{tij} = \mu_t(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})$ – турбулентный тензор вязких напряжений, $f_\sigma = \sigma_i\kappa_i\delta_s n_s$ – сила поверхностного натяжения, σ_i – коэффициент поверхностного натяжения, κ_i – кривизна, n_s – нормаль к поверхности [1].

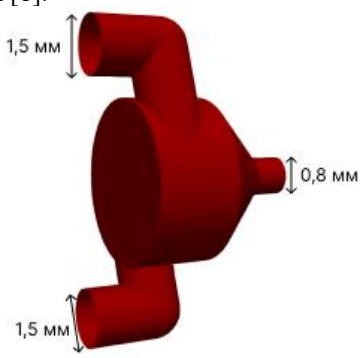


Рис. 1. Форсунка внутри расчетной области

Расчетная область представляла собой куб со стороной 21,45 мм. Размер ячейки адаптировался при помощи алгоритма Adaptive wavelet. Минимальный размер ячейки составлял 21 мкм. Жидкость подводилась внутрь расчетной области через каналы диаметрами 1.5 мм со скоростью 5 м/с. После приведения в вихревое движение внутри форсунки происходило истечение жидкости через сопло диаметром 0.8 мм.

На твердых поверхностях выполнялись условия прилипания и непротекания, на правой границе области реализовано условие свободного вытекания.

Проведено сравнение динамики смешивающихся и несмешивающихся жидкостей (рис. 2), задаваемых отсутствием или наличием поверхностного натяжения соответственно. Из рисунка видно различие в структуре межфазной поверхности: при расчетах с несмешивающимися жидкостями четко различимы пузырьки.

Также в результате расчетов получены поля скоростей на выходе из сопла, которые в дальнейшем будут использованы для расчетов истечения струи во внешнюю область. Такой раздельный подход позволяет увеличить разрешение расчета.

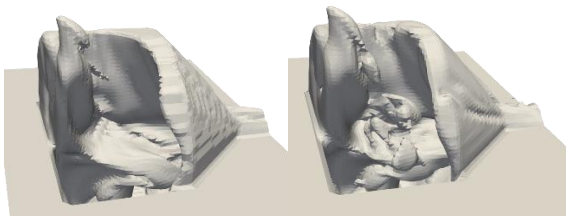


Рис. 2. Межфазная поверхность. Слева – между двумя смешивающимися жидкостями, справа – между двумя несмешивающимися жидкостями

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-79-10246).

Список литературы:

1. Popinet S. Numerical models of surface tension //Annual Review of Fluid Mechanics. – 2018. – Т. 50. – С. 49-75.

УДК 532

МЕТОДЫ ПАССИВНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ПОТОКОВ

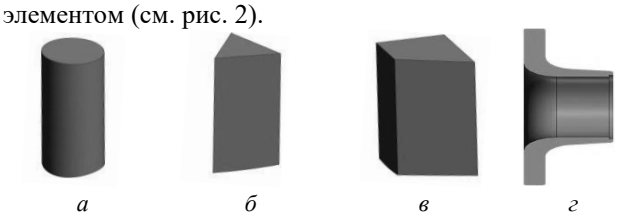
Байметова Е.С., Волков В.С.

Ижевский государственный технический университет им. М.Т.Калашникова,
426069, Россия, Ижевск, ул, Студенческая 7

Процессы механического перемешивания потоков используются во многих технических устройствах. Так как перемешивание одновременно способствует интенсификации процесса переноса за счет турбулизации потока, его используют в теплообменных аппаратах для ускорения процесса теплообмена [1, 2]. Задача качественного перемешивания многокомпонентных сред, характеризующихся различными физико-химическими свойствами, встает в случае необходимости увеличения степени гомогенизации гетерогенных потоков [3]. Выравнивание свойств необходимо, например, для корректной работы ряда измерительных устройств: поточные влагомеры и расходомеры, предназначенные для непрерывного получения актуальных данных о свойствах многокомпонентных и/или многофазных сред.

Пассивные методы перемешивания основаны на использовании стационарных геометрически сложных вставок, предназначенных для дробления потока с одновременным изменением скорости и направления движения. Эти вставки монтируются в систему перед измерительными устройствами.

В данной работе исследуются 4 различные формы вставок для перемешивания двухкомпонентного потока, состоящего из воды и масла (см. рис. 1). Исследование проводится на основе численного моделирования течения двухкомпонентной смеси в трубе с внутренним диаметром 51.5 мм со встроенным элементом (см. рис. 2).



а *б* *в* *г*

Рис. 1. Варианты геометрических вставок: а) цилиндр; б) призма; в) параллелепипед с трапециевидным основанием; г) сопло ИСА 1932.

Моделирование течения двухкомпонентной среды проводилось с использованием многофазной модели в рамках подхода Эйлера с использованием решателя *multiphaseEulearFoam* платформы *OpenFOAM*. Математическая модель базируется на численном решении нестационарных уравнений сохранения массы и импульса вязкой несжимаемой жидкости для каждого компонента потока, с учетом силы поверхностного натяжения.

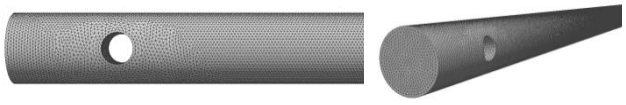


Рис.2. Расчетная сетка

На входе в расчетную область задавалась скорость течения жидкости, равная 0.379 м/с, на выходной границе поддерживалось нулевое избыточное давление. Результаты расчетов в виде распределения скорости и давления в продольном сечении показаны на рис. 3.

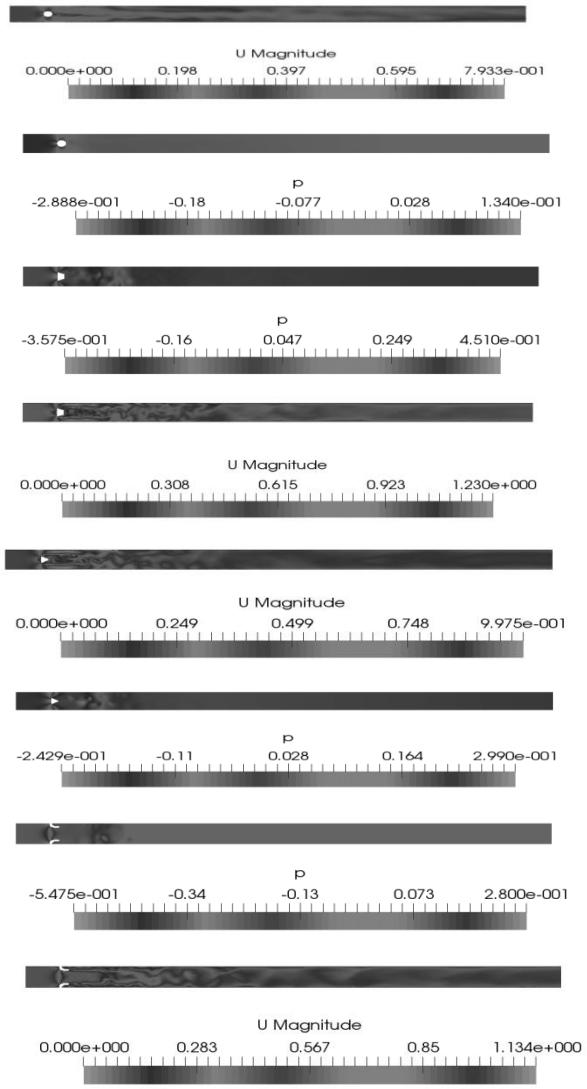


Рис. 3. Картины распределения давления и скорости

Сравнение 4-х видов вставок показало, что наиболее качественное перемешивание происходит при использовании сопла ИСА 1932.

Список литературы:

1. Моделирование сопряженного тепло-обмена в микроканалах в среде OpenFOAM / Байметова Е.С., Хвалько М.Е., Армянин А.Ю Труды Института системного программирования РАН. 2022. Т. 34. № 5. С. 205-214.
2. Байметова Е.С. Численное моделирование гидродинамических процессов в многоканальном коллекторе // Труды МАИ. 2023. № 130.
3. Королева М.Р., Волков В.С. Численное моделирование течения двухкомпонентной жидкости по трубе со статическим смесителем // Химическая физика и мезоскопия. 2024. Т. 26. № 1. С. 22-30.

УДК 621.1.016:532.66:532.62

ИЗУЧЕНИЕ ВОЛНОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОЛЬЦЕВОГО ГАЗОЖИДКОСТНОГО ТЕЧЕНИЯ ВДОЛЬ ШИРОКОЙ СТОРОНЫ ПРЯМОУГОЛЬНОГО МИКРОКАНАЛА

Барткус Г.В.[1], Кузнецов В.В.[1]

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

При кольцевом газожидкостном течении на межфазной поверхности образуются волны различной частоты и амплитуды, которые оказывают определяющее влияние на межфазное трение и массообмен [1]. Измерение их характеристик необходимо для глубокого понимания процессов и требует детального изучения.

Скорость течения, давление в системе, геометрия сечения канала и физические свойства фаз определяют характеристики межфазных волн. Основные виды волн на границе раздела в газожидкостном потоке подразделяются на волны ряби, волны возмущения и большие волны [2]. Волны ряби имеют крутой фронт волны, малое отношение амплитуды волны к ее длине и малое время жизни [3]. Волны возмущения [4] характеризуются большей скоростью, чем волны ряби, и большим интервалом между волнами. В каналах сложной геометрии, например в микроканале прямоугольного сечения, при кольцевом режиме течения реализуются как волны на узкой стороне, текущие по поверхности менисков, так и на широкой стороне, реализуемые на поверхности тонкой пленки жидкости. При увеличении приведенной скорости газа происходит выравнивание распределения жидкости за счет перетекания жидкости из менисков в пленку на широкую сторону канала.

Волновые характеристики для волн на короткой стороне микроканала были изучены в предыдущих работах [5, 6], где получены характеристики волн возмущений на поверхности менисков для смесей этанол-азот и PMS200-азот. Было получено, что увеличение числа Re_{gas} газа вызывало уменьшение остаточного слоя жидкости <L>/W и амплитуды волн <A>/W для обоих смесей. При достижении Re_{gas}>800 безразмерная толщина остаточного слоя переставала уменьшатся и достигала минимального значения <L>/W=0.035. Средняя амплитуда волн могла превышать в 2 раза значение среднего остаточного слоя для представленных расходов жидкости и газа для течения PMS200-азот. Увеличение вязкости более чем на два порядка (PMS200-азот) привело к увеличению амплитуды волн и толщины остаточного слоя более чем в 1.5 раза.

В данной работе проведено экспериментальное исследование характеристик волн возмущения, образующихся на поверхности широкой стороны микроканала для кольцевого режима течения для спутного газожидкостного течения азот-ПМС200 и азот-этанол. Азот подавался в прямой микроканал, выполненный из PDMS, расположенный горизонтально, а жидкость поступала через боковой смеситель перпендикулярно основному потоку газа.

На рис. 1 приведена высокоскоростная визуализация кольцевого режима течения в начале канала для приведенных скоростей жидкости и газа $J_{liq}=8.2\cdot10^{-3}$ м/с, $J_{gas}=63.3$ м/с, направление течение показано стрелкой. Как видно, наблюдаются волны на широкой стороне микроканала в центральной части кадра.

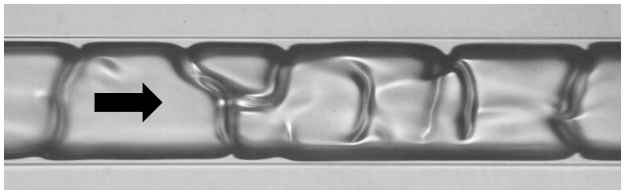


Рис. 1. Высокоскоростная визуализация кольцевого режима течения при $J_{liq}=8.2\cdot10^{-3}$ м/с, $J_{gas}=63.3$м/с для смеси азот-ПМС200, направление течение показано стрелкой.

С помощью высокоскоростной визуализации были получены области существования кольцевого режима течения и произведена обработка полученных данных. Установлены зависимости распределения волн по занимаемой площади на поверхности широкой стороны микроканала от приведенных скоростей газа и жидкости. Проведено сравнение с данными для разных жидкостей.

Полученные результаты о волновых характеристиках течения необходимы для решения задач тепломассобмена в микроканалах, так как волны на межфазной поверхности определяют величину поперечных перетоков жидкости и интенсификацию межфазного тепломассопереноса.

Список литературы:

1. Hewitt G. Annular two-phase flow / Elsevier, 2013. 327 с.
2. Azzopardi B. J. Drops in annular two-phase flow // International Journal of Multiphase Flow. 1997. Т. 23. №. 7. С. 1-53.
3. Asali J. C., Hanratty T. J. Ripples generated on a liquid film at high gas velocities //International journal of multiphase flow. 1993. Т. 19. №. 2. С. 229-243.
4. Vasques J., Cherdantsev A., Cherdantsev M., Isaenkov S., Hann D. Comparison of disturbance wave parameters with flow orientation in vertical annular gas-liquid flows in a small pipe //Experimental Thermal and Fluid Science. 2018. Т. 97. С. 484-501.
5. Bartkus G., Kuznetsov V. Study of annular flow wave characteristics in a rectangular microchannel for gas-liquid flow with a viscous liquid //E3S Web of Conferences. EDP Sciences. 2023. Т. 459. С. 04002.
6. Барткус Г. В., Кузнецов В. В. Исследование волновых характеристик кольцевого газожидкостного течения в прямоугольном микроканале // Сборник трудов конференции СТС-39. 2022. С. 14-17.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН (121031800215-4).

УДК 532

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ ВЯЗКИХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ЖИДКОСТЕЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Валиуллина В.И.[1], Галеев Р.Р.[1], Мусин А.А.[1], Зиннатуллин Р.Р.[1]

[1] Уфимский университет науки и технологий
450076, Россия, г. Уфа, ул. Заки Валиди, дом 32

Добыча тяжелой нефти привлекает все больше внимания в нефтяной промышленности. В настоящее время количество тяжелой высоковязкой нефти в мире в два раза больше, чем обычной нефти низкой вязкости, и так как доля высоковязкой нефти с каждым годом растет, возникает проблема эффективности добычи такой нефти. Высокая вязкость нефти создает серьезные проблемы при её добыче и транспортировке. Результаты экспериментов показывают, что многофазное течение высоковязкой нефти сильно отличается от течения низковязкой нефти [1].

Одним из способов добычи высоковязкой нефти является излучение электромагнитных волн в пласт посредством скважины от поверхностного генератора. Практическим результатом является мгновенное излучение в пласт электромагнитной энергии с переходом в тепловую и увеличение дебита скважины. Метод основан на принципе, что нефть является проводящей средой, а породный материал – изолятором, который позволяет использовать электромагнитное поле для добычи нефти [2].

Целью настоящей работы является экспериментальное изучение фильтрации вязких углеводородных жидкостей, содержащих полярные компоненты, под воздействием низкочастотного и высокочастотного электромагнитного поля. Для этих целей была создана микромодель пористой среды. Конструктивной особенностью ячейки являются электроды, напряженность электромагнитного поля направлена вдоль вектора фильтрации жидкости. Давление, заданное контроллером Parker VSO-BT, нагнетается безмасляным воздушным компрессором в буфер, из которого нефть перетекает по трубкам в ячейку. Измерение вытесненной нефти проводилось на аналитических весах A&D GR-300. Электромагнитное поле создается с помощью генератора сигналов «T&C PowerConversion AG 1021 Amplifier/Generator». Объектом исследования являлась нефть с различным содержанием асфальтенов, смол и парафинов (АСП).

В ходе экспериментов было замечено, что воздействие поля привело либо к незначительному увеличению расхода, либо к его уменьшению в сравнении с фильтрацией без воздействия поля. Принимая во внимание конструктивные особенности микромодели можно предположить, что причиной стало действие диэлектрофоретических сил. Также можно увидеть, что при увеличении перепада давления значение расхода жидкости уменьшается под воздействием поля. Можно предположить, что данное явление происходит из-за возникновения эффекта запирания. Кроме того, при сравнении результатов экспериментов с разным содержанием АСП в нефти выявлено, что влияние диэлектрофоретических сил и эффекта запирания увеличивается при повышении содержания полярных компонент в нефти.

В результате проведенных исследований можно сделать следующие основные выводы:

1. Показано, что при направлении вектора напряженности электрического поля вдоль направления фильтрации расход жидкости увеличивается, что объясняется возникновением диэлектрофоретических сил, влияющих на фильтрацию.

2. Обнаружено, что при увеличении перепада давления наблюдается снижение расхода жидкости, что объясняется возникновением эффекта запирания.

3. Показано, что при нахождении частоты поля в области поляризации полярных компонент нефти все наблюдаемые эффекты от действия поля усиливаются, также воздействие диэлектрофоретических сил и эффекта запирания усиливается при увеличении содержания полярных компонент в нефти.

Список литературы:

1. Zhang H. Q., Sarica C., Pereyra E. Review of high-viscosity oil multiphase pipe flow //Energy & Fuels. 2012. Т. 26. №. 7. С. 3979-3985.
2. Хрисониди В. А., Струева В. А. Современные методы разрушения водонефтяных эмульсий //The scientific heritage. 2020. №. 50-3. С. 38-41.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-11-20042

УДК 532.5

ВЛИЯНИЕ БЕЗРАЗМЕРНОЙ ЧАСТОТЫ ВИБРАЦИЙ НА ПАРАМЕТРИЧЕСКУЮ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ЖИДКОСТЕЙ В ЩЕЛЕВОМ ЗАЗОРЕ

Власова О.А., Козлов В.Г.

Лаборатория вибрационной гидромеханики,
Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет,
614045, Россия, Пермь, ул. Сибирская, 24

Выполнено экспериментальное исследование динамики границы раздела несмешивающихся жидкостей разной плотности в совершающем вертикальные поступательные колебания полости в виде вертикального щелевого зазора, образованного оргстеклянными пластинами. Зазор имеет толщину d = 1.8 и 2.3 мм, ширина полости – 74 мм. Полость, заполненная парой маловязких несмешивающихся жидкостей различной полости, совершает гармонические вертикальные колебания с заданной частотой и амплитудой. В качестве рабочих жидкостей используются силиконовое масло ПМС – 0.65 и флуоринерт FC – 40, относительная плотность которых ρ = 0.42, коэффициент межфазного натяжения σ = 2.3 мН/м.

Эксперименты проводятся в широком диапазоне безразмерных частот, характеризующих вязкое взаимодействие жидкостей со стенками осциллирующего канала. Безразмерная частота каждой из пары жидкостей определяется по формуле $\omega = \Omega d^2/\nu$, где $\Omega = 2\pi f$ – циклическая частота колебаний, d – ширина щелевого зазора, ν – кинематическая вязкость жидкости. В представленном исследовании изучается влияние безразмерной частоты колебаний на устойчивость межфазной поверхности. Рассматривается случай, когда безразмерные частоты близки по величине ($\omega_1 \approx \omega_2$) и достаточно велики, когда ширина зазора превосходит толщину слоя Стокса. Исследование устойчивости горизонтальной границы раздела проводится при варьировании амплитуды, частоты колебаний и толщины канала.

Обнаружено пороговое возбуждение параметрических колебаний границы раздела, которые происходят с частотой вдвое меньшей частоты колебаний полости (рис. 1). Волновые процессы, возникающие на межфазной границе, обусловлены совокупностью дестабилизирующего действия вибраций и стабилизирующего действия гравитации и сил поверхностного натяжения на границе раздела жидкостей.

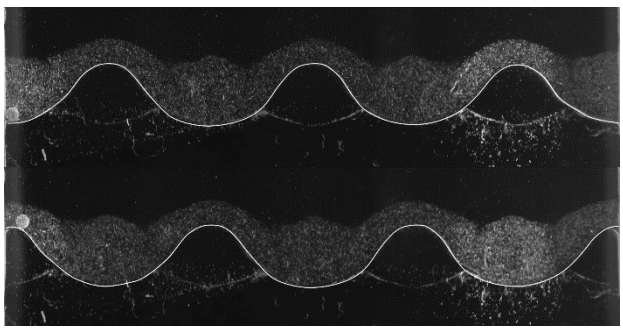


Рис. 1. Форма границы раздела жидкостей в фазе максимального смещения межфазной границы через период колебаний (d = 1.8 мм, f = 9.5 Гц)

Получены пороговые кривые возбуждения неустойчивости границы раздела. Определена зависимость длины волны неустойчивости от частоты колебаний полости. Показано, что обнаруженная мода неустойчивости аналогична волнам Фарадея на границе раздела невязких жидкостей, волновое число которых определяется дисперсионным соотношением [1]. Данные о длине стоячей волны, полученные в эксперименте, находятся в хорошем согласии с указанной теорией для волн малой амплитуды на границе раздела невязких жидкостей различной плотности в отсутствие боковых стенок [1].

Возбуждаемые в щелевом зазоре параметрические колебания межфазной границы имеют гравитационно-капиллярную природу. Показано, что вязкое взаимодействие с боковыми стенками полости оказывает стабилизирующее действие на порог вибрационного возбуждения параметрических колебаний границы, в области умеренных и низких безразмерных частот пороговое значение безразмерного вибрационного ускорения возрастает с понижением безразмерной частоты.

Список литературы:

1. Benjamin T. B., Ursell F. J. The stability of the plane free surface of a liquid in vertical periodic motion// Proc. R. Soc. London, Ser. A. 1954. V. 225. №. 1163. P. 505-515.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект 23-11-00242)

УДК 536.24

ДИНАМИКА И РЕЖИМЫ КИПЕНИЯ КАПЛИ HFE-7100 И ВОДЫ ПРИ СОУДАРЕНИИ С ПЕРЕГРЕТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Гатапова Е.Я.[1], Ситников В.О.[2]

[1] Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1
[2] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Изучение процессов, происходящих в диэлектрических легкокипящих жидкостях при быстром изменении температуры является важным в связи с использованием данных жидкостей в системах охлаждения различных электронных устройств. В частности, при спрейном охлаждении происходит взаимодействие капли жидкости с нагретой поверхностью [1]. Изучению данного процесса посвящено множество работ [2,3]. В данной работе представлены результаты исследований динамики капли жидкости, режимов кипения, а также температурного поля на поверхности капли при взаимодействии с перегретой поверхностью.

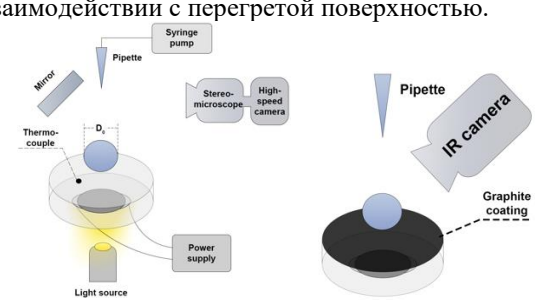


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. Слева направо: схема для съемки сверху высокоскоростной камерой, схема для съемки ИК-камерой подложки с графитовым напылением.

Экспериментальная установка (Рис. 1) состоит из рабочего участка, подложки с нагревателем и камеры. Рабочий участок состоит из шприцевого насоса со стеклянным шприцем Hamilton 10 ml, пипетки с диаметром 0,35 мм и подвижного держателя, на котором закреплена пипетка для изменения высоты падения капли. В качестве подложки использовалось сапфировое стекло диаметром 40 мм и толщиной 4 мм с нанесенным на него электропроводящим нагревателем из оксида индия-олова (ITO). В силу того, что сапфировое стекло прозрачно для ИК-камеры, на сторону падения капли было нанесено черное покрытие для наблюдения за температурой поверхности. В экспериментах использовалась высокоскоростная камера Phantom VEO 410L и ИК-камера FLIR X6530sc. Видеонаблюдение проводилось через зеркало, расположенной под 45° к подложке, для получения вида сверху. ИК-камера была установлена под углом около 75° и на расстоянии около 30 см от наблюдаемой области (Рис. 1). В качестве исследуемых жидкостей использовались дегазированная деионизированная вода и диэлектрическая жидкость HFE-7100. Температура подложки варьировалась от 85 до 180 ±1°C для воды и от 60 до 145±1°C для HFE-7100. Варьируя высоту падения с 50 до 130 ±1 мм для воды и с 36 до 150 ±1 мм для HFE-7100, были получены числа Вебера 20-84 для воды и 104-345 для HFE-7100.

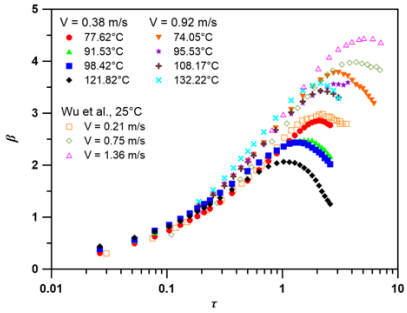


Рис. 2. Изменение диаметра капель HFE-7100 при различных скоростях. Сравнение с данными Wu et al. [4] (пустые символы).

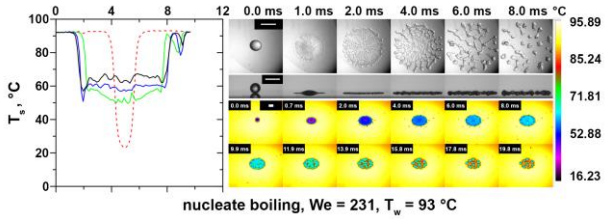


Рис. 3. Профили, поля температур и кадры видеосъемки для жидкости HFE-7100 для числа We = 231 и начальной температуры подложки 93°C в режиме пузырькового кипения.

Проведены экспериментальные исследования динамики капли (Рис. 2) и температурных профилей при различных режимах кипения и числах Вебера для воды и жидкости HFE-7100 (Рис. 3). Построены карты режимов кипения, проведено сравнение с литературными данными. Подробные данные о взаимодействии капли HFE-7100 с нагретой поверхностью представлены впервые.

Список литературы:

1. Khandekar S. et al. Cooling of high-power LEDs by liquid sprays: Challenges and prospects //Applied Thermal Engineering. – 2021. – Т. 184. – С. 115640.
2. G. Liang, I. Mudawar, Review of mass and momentum interactions during drop impact on a liquid film, International Journal of Heat and Mass Transfer 101 (2016) 577–599.
3. E.Y. Gatapova, K.B. Gatapova, Bubble dynamics in thin liquid film and breakup at drop impact, Soft Matter 16 (2020) 10397–10404. doi:10.1039/D0SM01882A.
4. Wu T. et al. Maximum Spreading of Hydrofluoroether Drop Impacting on a Smooth Surface //Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2023. – Т. 62. – №. 36. – С. 14735-14742.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-19-00581, https://www.rscf.ru/project/22-19-00581/).

УДК 532.529.6

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНО АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ НА РАЗМЕР И ХАРАКТЕР ДВИЖЕНИЯ ПУЗЫРЕЙ ОТ ОДИНОЧНОГО КАПИЛЛЯРА В НАКЛОННОЙ ТРУБЕ

Гореликова А.Е.[1,2], Волков С.М.[1,2], Воробьев М.А.[1,2]

[1] Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2
[2] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Турбулентные пузырьковые течения реализуются в различных технических приложениях и характеризуются существенным разнообразием особенностей, неприсущих однофазным течениям. Введение пузырей в поток жидкости приводит к изменению гидродинамических свойств течения, а также значительно влияет на тепло и массообменные процессы в потоке.

Для газожидкостных течений существует проблема контроля размеров газовых пузырей. В работе [1] показано, что в нисходящем пузырьковом течении изменение размера дисперсной фазы может приводить как к интенсификации, так и к ухудшению теплообмена по сравнению с однофазным течением при постоянных расходах жидкости и газа на входе в канал.

Контролировать размер пузырей при высоких расходах газа за счет изменения геометрии генератора пузырей не представляется возможным, так как вниз по течению происходит их активная коалесценция, определяющая дисперсный состав газожидкостной смеси. Поэтому встает вопрос об использовании поверхностно-активных веществ для исключения появления крупных пузырей. Даже незначительные добавки поверхностно-активных веществ могут оказывать существенное влияние на поверхностное натяжение и, как следствие, на режим газожидкостных течений [2].

В работе представлено экспериментальное исследование влияния поверхностно активных веществ на размер и динамику газовых пузырей в наклонной трубе. Использовалась установка, подробно описанная в работе [3]; характеристики газовых пузырей были получены с помощью метода теневой фотосъемки. В работе были использованы две рабочие жидкости: дистиллированная вода и раствор спирта с массовой долей 1%, расход газа изменялся в диапазоне Q_g = 2÷8 мл/мин, угол наклона трубы – θ = 30÷60°.

На рисунке 1 приведены характерные кадры газовых пузырей на расстоянии 600 мм от места ввода газа в жидкость при угле наклона θ = 45°. В дистиллированной воде (*1*) уже при расходе газа 5 мл/мин пузыри активно группируются и из-за коалесценции увеличивается средний размер газовых пузырей, а их количество уменьшается. Даже малые добавки поверхностно активных веществ (*2*) оказывают значительное влияние на коалесценцию пузырей, подавляя ее. При увеличении расхода газа и увеличении количества пузырей, коалесценция не происходит даже при значительных углах наклона трубы и больших пройденных расстояниях от места ввода газа.

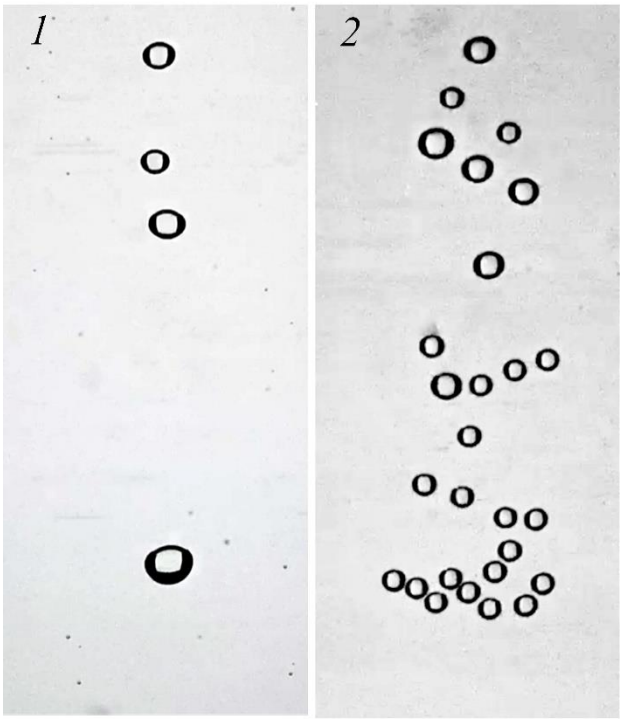


Рис. 1: Газовые пузыри от одиночного капилляра в наклонной трубе, θ = 45°. *1* – Q_g = 5 мл/мин, дистиллированная вода, 2 – Q_g = 8 мл/мин, 1% ПАВ

При этом происходит активное формирование кластеров из множества пузырей, двигающихся единой группой, что также приводит к значительным изменениям характера движения газовой фазы.

Список литературы:

1. Lobanov P.D. Wall Shear Stress and Heat Transfer of Downward Bubbly Flow at Low Flow Rates of Liquid and Gas // Journal of Engineering Thermophysics. 2018. Vol. 27, № 2. P. 232–244.
2. Xia G.D., Chai L. Influence of surfactant on two-phase flow regime and pressure drop in upward inclined pipes // Journal of Hydrodynamics. 2012. Vol. 24, № 1. P. 39–49.
3. Gorelikova, A.E.; Randin, V.V.; Chinak, A.V.; Kashinsky, O.N. The Effect of the Angle of Pipe Inclination on the Average Size and Velocity of Gas Bubbles Injected from a Capillary into a Liquid. Water 2023, 15, 560. https://doi.org/10.3390/w15030560

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (№24-21-20023, https://www.rscf.ru/project/24-21-20023/) и финансовой поддержки Правительства Новосибирской области (соглашение № р-90 от 22.03.2024)

УДК 532.525.3

МЕТОДИКА УПРОЩЕННОГО CFD РАСЧЕТА РАСПЫЛА ЦЕНТРОБЕЖНЫМИ ФОРСУНКАМИ

Дектерев Ар.А.[1,2], Дектерев А.А.[1,2]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] Сибирский Федеральный Университет,
660041, Россия, Красноярск, пр. Свободный, 7

Центробежные форсунки широко используются для распыла жидкого топлива в камерах сгорания различного назначения. Параметры распыла топлива (угол раскрытия факела, плотность заполнения конуса распыла, скорости капель и их фракционный состав) существенно определяют характер горения.

Для оценки параметров распыла широко используют полуэмпирические модели, которые позволяют определить характеристики распыла форсунок, но диапазон их применимости ограничен как режимными параметрами, так и геометрией форсунок. Тем не менее, данные методики могут быть использованы на этапе предварительной оценки характеристик проектируемых форсунок.

Наиболее детальное моделирование течения жидкости в элементах форсунки и распада струи может проводиться на основе двухфазного подхода VOF с применением вихреразрешающих моделей турбулентности [1]. Использование такого подхода для получения характеристик распыла требует сеточного разрешения всех масштабов капель, что соответственно приводит к измельчению и шага по времени. Подобные расчеты требуют огромного количества вычислительных ресурсов и времени и не могут быть использованы для прикладных многовариантных расчетов, тем более в совокупности с моделированием процессов испарения и горения.

В данной работе предлагается методика упрощенного CFD расчета распыла. Для формирования установившегося течения жидкости внутри центробежной форсунки требуется достаточно продолжительное время, в течение этого времени нецелесообразно рассчитывать внешнюю струю жидкости с детальным сеточным и временным разрешением. Предлагается проводить расчет с относительно крупным временным шагом и грубой сеткой во внешней области, при этом для дополнительной экономии ресурсов периодически производится удаление жидкой фазы во внешней области за пределами форсунки. После достижения установившегося течения в форсунке и формирования воздушного ядра, приводящего к образованию конусной пленки жидкости, включается механизм автоматической детализации сетки для детального разрешения фазовой границы и уменьшаются шаги по времени. Расчет проводится до начала распада жидкой пленки (рисунок 1). Такая методика позволяет получить угол раскрытия, расстояние от среза сопла до начала разрыва пленки и скорость капель в зоне начала распыла за время, приемлемое для инженерных многовариантных расчетов.

Далее можно либо продолжать полноценный VOF расчет, либо использовать сопряженный подход ELSA, при котором для экономии ресурсов отдельные капли преобразуются в Лагранжевы частицы (рис. 2). Для прикладных расчетов, особенно с горением, целесообразно использовать полученные параметры распыла как начальные условия для Лагранжева метода дискретных частиц с применением моделей вторичного распыла.

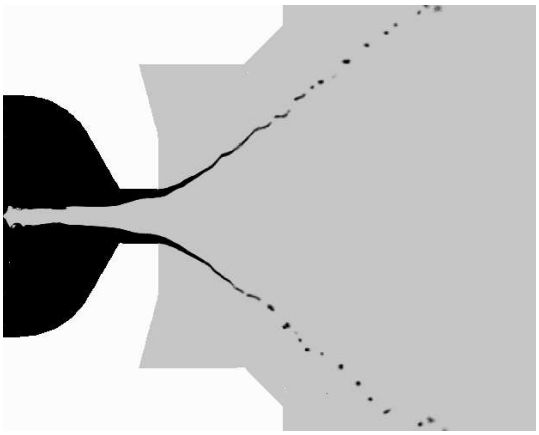


Рис. 1. Доля жидкой фазы в сечении

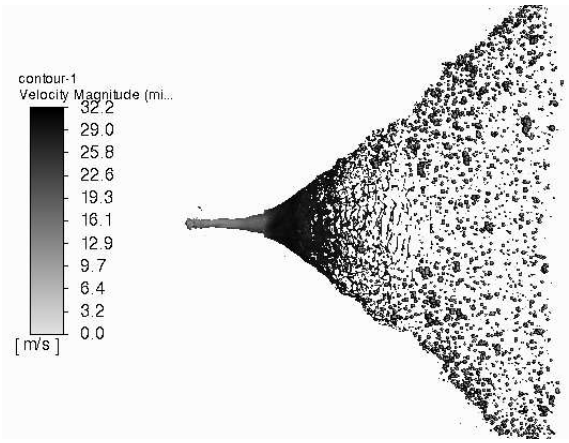


Рис.2. Изоповерхность жидкой фазы, цветом обозначена скорость, м/с

Список литературы:

1. Вожаков И.С., Хребтов М.Ю., Мулляджанов Р.И. моделирование распыления закрученной струи керосина// Сборник трудов конференции XXXVIII Сибирский теплофизический семинар, Новосибирск, 2022. С. 36-40.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение от 24.04.2024 № 075-15-2024-543.

УДК 621.9

ИНЕРЦИОННЫЕ ВОЛНЫ БОЛЬШОЙ АМПЛИТУДЫ

Держо О.Г.[1]

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

Многочисленные исследования инерционных волн в осесимметричных закрученных потоках в трубах, в основном мотивированы возможной связью между такими волнами и явлением разрушения вихрей [1,2]. Это, в высшей степени, нелинейный эффект демонстрирует чрезвычайную чувствительность к широкому спектру внешних факторов влияния и на сегодняшний день не существует общепринятой канонической модели этого явления. В ранних исследованиях для случая прямых труб было замечено влияние, направленное вверх по течению, приводящее к образованию зоны отрыва на верхней границе. Одним из способов решения этой проблемы является стимулирование рециркуляционной зоны за счет локального сжатия трубки, так что зона отрыва наблюдается ниже по потоку от этого локального сжатия [3]. Другой вариант включает введение особых условий на входе, предотвращающих распространение возмущений [4]. Сложные расчеты, включающие в себя генерацию вихрей из лопастного генератора и тщательное моделирование геометрии экспериментальной установки описаны в [5]. Во всех упомянутых исследованиях фиксировалась конкретная геометрия трубки и влияние ее изменений на закономерности течения не рассматривалось. Такие изменения профиля трубы являются предметом исследований, например, в [6]. В данной работе исследования изменения профиля трубы основаны на теоретической модели автора [7]. В этой работе приведена модель для стационарных осесимметричных структур, которые могут содержать замкнутые линии тока. Теория не ограничивается инерционными волнами малой, но конечной амплитуды [2,8]. Теория построена для частного, но важного случая, когда набегающий поток почти однороден, с целью подчеркнуть эффекты связано с влиянием изменения поперечного сечения трубки. Амплитуда инерционной волны не предполагается малой и допускает замкнутые линии тока как у границы трубы, так и в её центральной части. Математическая модель и соответствующие асимптотики разработаны. Будет представлено несколько расчетов для случая вращения жидкости близкого к твёрдотельному. Окончательно, анализируется связь предсказаний теории с экспериментально наблюдаемыми эффектами. Рассматривается осесимметричное стационарное течение невязкой недиффузионной закрученной жидкости постоянной плотности. Уравнением для функции тока является уравнение Брэгга-Хосорна [9]. Рассмотрена геометрия, в которой за расходящимся участком трубки следует интервал схождения, обнаружено, что зона отрыва может состоять из пузыреобразной части, которая в конечном итоге присоединяется к расходящемуся хвосту. Структура течения полностью меняется именно за счет небольшого сужения трубы. В расчётах наблюдалась форма зоны отрыва, аналогичная представленной Сарпкая [10] для случая турбулентного режима в расширяющейся трубе. Возможное объяснение этого совпадения может быть следующим. Для изученных турбулентных режимов Сарпкая [10] турбулентный пограничный слой развивается гораздо быстрее, чем в классических работах о ламинарном распаде [2]. Наконец, в определенном сечении происходит сужение волновода за счет растущего турбулентного пограничного слоя на стенке и это может конкурировать и даже преобладать над фактическим расширением радиуса трубы и таким образом эффективно создавать профиль ограничивающей границы как с расходящимся (начальным), так и с расходящимся (начальным) и сходящиеся частями.

Работа выполнена в рамках государственного задания для ИТ СО РАН.

Список литературы:

1. Lucca-Negro O, O'Doherty T, 2001, Vortex breakdown: a review. *Prog.Energy Combust. Sci*., 27,431-481
2. Leibovich, S 1991,Vortex breakdown: a coherent transition trigger in concentrated vortices, in *Turbulence and Coherent Structures*, editors O. Metais and M. Lesieur, Kluwer, 285-302
3. Beran P, 1994, The time asymptotic behaviour of vortex breakdown in tubes, *Computers Fluids*, 23, 917-937
4. Rusak Z, Wang S, Whiting, C, 1998 The evolution of a perturbed vortex in a pipe to axisymmetric vortex breakdown, *J. Fluid Mech.*, 366, 211-237
5. Snyder D, Spall R, 2000, Numerical simulation of bubble type vortex breakdown within a tube-and-vane apparatus, *Phys. Fluids*, 12 (3), 603-608
6. Rusak Z, Zhang Y, Lee H, Wang S, 2017, Swirling flow states in finite-length diverging or contracting circular pipes. *Journal of Fluid Mechanics*. 819, 678-712.
7. Derzho O, Grimshaw R, 2002, Solitary waves with recirculation zones in axisymmetric swirling flows, *J. Fluid Mech.*, 464, 217-250
8. Meliga P, Gallaire F, Chomaz J-M, 2012, A weakly nonlinear mechanism for mode selection in swirling jets. *J. Fluid Mech*., 699, 216-262
9. Bragg, S. L., Hawthorne, W. R. 1950 Some exact solutions of the flow through annular cascade actuator discs. *J. Aero. Sci.* 17, 243–249.
10. Sarpkaya T, 1995, Turbulent vortex breakdown, *Phys. Fluids*, 7(10), 2301-2303.

УДК 532.62

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ТОНКОЙ ЖИДКОЙ ПЛЁНКИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ГАЗОВЫМ ВИХРЕМ

Дрожжин А.П.[1]

[1] Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15

Исследование неустойчивости течения свободной плёнки жидкости, изучение её деформации и образования трёхмерных структур с последующим диспергированием на мелкие капли имеет важное фундаментальное и прикладное значение.

В работе представлены результаты экспериментального исследования взаимодействия вихревого потока газа с мыльной жидкой плёнкой. Газовый вихрь формировался внутри закрытой цилиндрической камеры переменного сечения при сжигании смеси паров петролейного эфира с воздухом (см. Рис. 1). Длина l_1 и внутренний диаметр d_1 секции *1* были равны 55 мм и 5 мм, соответственно. Для секции *2* — l_2=16 мм и d_2=29 мм. Камера закрывалась мыльной плёнкой воды *3* со стороны секции *2* и вращалась с частотой 3 Гц вокруг оси симметрии. Воспламенение горючей смеси осуществлялось на расстоянии 35 мм от закрытого края секции *1* высоковольтным электрическим разрядом (на рисунке не показан). Видеорегистрация процесса деформации и разрушения плёнки жидкости осуществлялась при помощи скоростной камеры НАНОГЕЙТ 22-16 со временем экспозиции 100 нс и периодом съёмки 63 мкс.

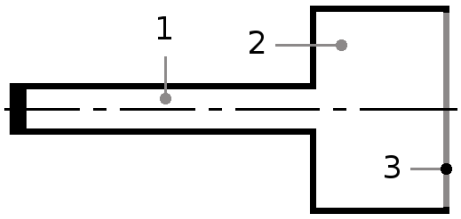


Рис. 1. Схема закрытой цилиндрической камеры сгорания. 1 и 2 — сообщающиеся между собой секции, 3 — мыльная плёнка воды.

При истечении газа из секции *1*, за счёт расширения продуктов сгорания, в секции *2* формировался газовый вихрь, который в свою очередь деформировал плёнку жидкости. Было обнаружено, что когда плёнка приобретала форму эллипсоида вращения, происходило разрушение её поверхности в виде ячеистой сетчатой структуры (Рис. 2). Далее происходило диспергирование рёбер сетки на мелкие капли воды.

Появлению сетчатой структуры предшествует развитие неустойчивости поверхности плёнки. Неустойчивость свободной жидкой плёнки в виде ячеистой структуры исследовалась ранее в работах [1, 2] при совместном истечении воды и газа из форсунок в атмосферу.

Особенностью результатов, представленных в настоящей работе, является возникновение ячеистой неустойчивости поверхности плёнки воды, содержащей поверхностно-активные вещества, только при её расширении в виде сфероида. При этом вдоль внутренней поверхности плёнки формируется осесимметричное поле скоростей газового потока, обусловленное вихревым характером движения ещё не сгоревшей смеси и продуктов сгорания.

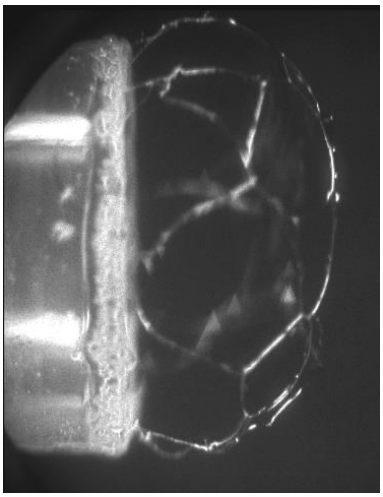


Рис. 2. Разрушение плёнки воды в виде сетчатой структуры с последующим диспергированием на мелкие капли

В работе обсуждаются возможные механизмы возникновения обнаруженной неустойчивости.

Список литературы:

1. Park J., Huh K.Y, Li X., Renksizbulut M. Experimental investigation on cellular breakup of a planar liquid sheet from an air-blast nozzle // Phys. Fluids. 2004. V. 16, P. 625-632.
2. Stapper B.E., Sowa W.A, Samuelsen G.S. An experimental study of the effects of liquid properties on the breakup of a two-dimensional liquid sheet // J. Eng. Power. 1992. V. 114, P. 39-45.

УДК 532.5

ОСЦИЛЛЯЦИОННОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ

Дьякова В.В., Власова О.А., Козлов В.Г.

Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет,
614045, Россия, Пермь, ул. Сибирская, 24

Экспериментально исследуется динамика осциллирующей границы раздела двух несмешивающихся маловязких жидкостей различной плотности. В качестве рабочих жидкостей выбраны силиконовое масло ПМС – 0.65 и флуоринерт FC – 40 (относительная плотность жидкостей $\rho = \rho_1/\rho_2 = 0.42$, коэффициент межфазного натяжения $\sigma = 2.3$ мН/м). Эксперименты проводятся в плоском вертикальном щелевом канале толщиной $d = 2.3$ мм, заполненном парой несмешивающихся жидкостей так, что их граница раздела находится в средней части щелевого канала. Для визуализации течений, возбуждаемых вблизи осциллирующей границы раздела, в верхнюю легкую жидкость (силиконовое масло) добавлены частицы визуализатора диаметром 40 мкм, которые в поле силы тяжести оседают и собираются вблизи межфазной границы. Щелевой канал подключается к гидравлическому контуру, обеспечивающему гармоническое вертикальное колебательное движение жидкостей в широком диапазоне амплитуд и частот осцилляций. Обнаружено, что при достижении критической амплитуды колебаний столба жидкостей на границы раздела возбуждаются параметрические колебания с частотой вдвое меньшей частоты колебаний жидкостей в канале (см. рис. 1). Увеличение амплитуды колебаний жидкости при фиксированной частоте приводит к увеличению амплитуды параметрических колебаний границы раздела, при этом пространственный период волны остается неизменным. С повышением частоты колебаний жидкости количество «холмов» стоячей волны увеличивается, а ее пространственный период уменьшается дискретным образом.

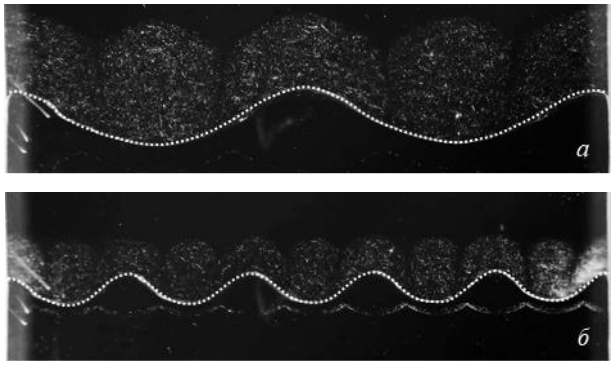


Рис. 1. Фотографии границы раздела силиконовое масло – флуоринерт в плоскости щелевого канала в фазе максимального смещения межфазной границы вверх: f = 8 Гц (а) и f = 12 Гц (б)

Сравнение экспериментальных результатов с классическим дисперсионным соотношением для границы раздела невязких жидкостей различной плотности [1] указывает на гравитационно-капиллярную природу возбуждаемых в эксперименте параметрических колебаний межфазной границы.

Особенностью выполненных исследований является то, что жидкости совершают колебания в узком щелевом зазоре. Обнаружено, что в ходе колебаний межфазная поверхность смещается поочередно в верхнюю и нижнюю жидкость в форме языка, а контактная линия остается практически неподвижной. Смещение межфазной поверхности в верхнюю и нижнюю жидкость относительно контактной линии (длина языка) в ходе колебаний происходит на разную глубину и определяется углом смачивания. Исследование динамики межфазной поверхности и генерируемых вблизи границы вихревых осредненных течений (см. рис. 1) при осцилляционном движении жидкостей в тонких щелевых каналах актуально в плане разработки осцилляционных методов интенсификации массопереноса через межфазную поверхность.

Список литературы:

1. Benjamin T. B., Ursell F. J. The stability of the plane free surface of a liquid in vertical periodic motion// Proc. R. Soc. London, Ser. A. 1954. V. 225. №. 1163. P. 505-515.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект 23-11-00242)

УДК 532.5

КОРРЕКЦИЯ ОШИБОК В КОРРЕЛЯЦИОННОМ АНАЛИЗЕ ПРИ ОБРАБОТКЕ ТЕНЕВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЕЙ

Евдокименко И.А., Лобанов П.Д., Чинак А.В., Филиппский К.А.

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

В настоящее время корреляционный анализ сигналов находит широкое применение в различных методах экспериментальных измерений. Это подтверждается использованием таких методов, как цифровая трассерная визуализация (PIV), корреляционные тепловые датчики, а также методы, позволяющие измерять скорость и размеры пузырьков с помощью оптических технологий.

Корреляционный анализ применяется для определения сдвигов сигналов во времени и пространстве. В практических измерениях сигналы часто обладают низким соотношением сигнал/шум, что затрудняет обработку данных. Также, на качество полученных данных влияют, как технические параметры измерительного оборудования, так и условия эксперимента, в том числе сложность протекания процесса. Проведение коррекции ошибок позволяет повысить точность и надежность результатов измерений, что является ключевым аспектом для дальнейшего развития и усовершенствования экспериментальных методик в области динамики жидкостей и газов.

Цель данного исследования заключается в разработке и обосновании метода коррекции ошибок при определении скорости газовых пузырей на основе теневых изображений, снятых с большими временными интервалами в условиях стационарного течения.

Для проведения коррекции ошибок использовались данные теневой съемки, полученные при всплытии газовых пузырей в оргстеклянной барботажной колонне прямоугольного сечения с размерами 800x200x50 мм. Колонна заполнена жидкостью до уровня H_0=500 мм. Подача газа в колонну осуществляется через 36 капилляров с диаметром 0,5 мм, установленных в основании канала. Приведенная скорость газа в эксперименте составляла U_G= 0,004 м/с. Теневая съемка осуществлялась при помощи цифровой камеры Hisense Zyla с максимальной частотой съемки 50 Гц. При проведении эксперимента скорость съемки ограничивалась до 15 кадров/с.

В работе использовался «non-post-interrogation» метод. Этот метод включает в себя корректировку исходных данных перед применением алгоритма для нахождения локального максимума корреляционной функции.

В данном случае, полученные изображения характеризуются большим количеством объектов и низким соотношением сигнал/шум. На рисунке 1 приведена фотография всплытия пузырей в барботажной колонне. При условии стационарности потока или его очень медленных изменений, можно предположить, что информативный пик корреляционной функции будет располагаться в одном и том же месте.

Рисунок 1. Фотография пузырькового потока

Исходя из этого, предполагается, что сложение корреляционных полей поэлементно приведет к усилению соотношения сигнал/шум, поскольку случайные пики будут компенсировать друг друга, в то время как информативные пики будут складываться и усиливаться. Результаты, представленные на рисунке 2, демонстрируют, что при суммировании большого числа кадров, интенсивность основного пика значительно возрастает по сравнению с фоновыми шумами., что делает возможным четко выделить главный информативный пик корреляционной функции.

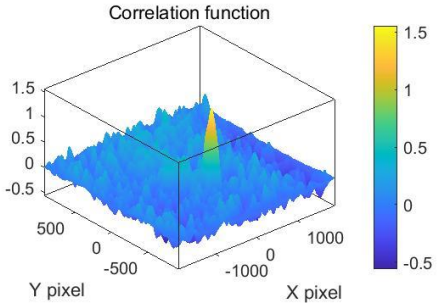


Рисунок 2. Результат суммирования корреляционных функций для двадцати кадров

Также была проведена обработка данных, полученных при таких же расходах газа, снятых парами изображений с малым интервалом времени между ними. Расхождение между результатами работы двух методов составляет около 1%.

В данной работе показано, что для стационарного течения, накопление «зашумленных» данных может позволить получить результат без потери точности. Средняя скорость пузырей в эксперименте составила 0,22 м/с.

Список литературы:

1. Мамыкин А. Д. Измерение скорости неизотермических потоков жидких металлов методом кросскорреляции .Труды Института механики УрО РАН" Проблемы механики и материаловедения". 2014. С. 111-115.
2. Raffel M., Willert C. Wereley S.T., Kompenhans J.. Particle image velocimetry: a practical guide. Springer. 2018. P.478

УДК 532.5

ДВИЖЕНИЕ ДВУХФАЗНОЙ СРЕДЫ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ПУЧКЕ ТРУБ ПРИ РАЗНЫХ РЕЖИМАХ ТЕЧЕНИЯ

Прибатурин Н.А.[1], Лобанов П.Д.[1], Евдокименко И.А.[1], Филиппский К.А.[2]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] Новосибирский государственный технический университет,
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Двухфазный поток через горизонтальный или наклонный пучок труб обычно встречается в теплообменниках кожухотрубного типа, таких как конденсаторы, испарители и т.д. В частности, результаты исследований подобных течений жизненно важны для обоснования безопасности и надежности работы парогенераторов ядерных энергетических установок с различными типами теплоносителей.

Исследование движения двухфазной среды в моделях парогенераторов актуально с точки зрения развития различных аварийных процессов. Например, в двухфазном потоке могут возникать вибрации теплообменных трубок, что может привести к различным повреждениям, в том числе за счет фреттинг-коррозии [1]. Для разрабатываемых в настоящее время реакторных установок с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями задачи истечения парожидкостной смеси из поврежденной теплообменной трубки в поток теплоносителя необходимо рассматривать с точки зрения двух основных сценариев развития аварийных процессов. Одним из них является гильотинный разрыв трубки парогенератора с повреждением окружающих трубок. Во втором сценарии предполагается возникновение малой течи с генерацией мелких пузырей дисперсной фазы, которые могут попасть с потоком в главный циркуляционный насос и, далее, в тепловыделяющую сборку, что приведет к повышению реактивности.

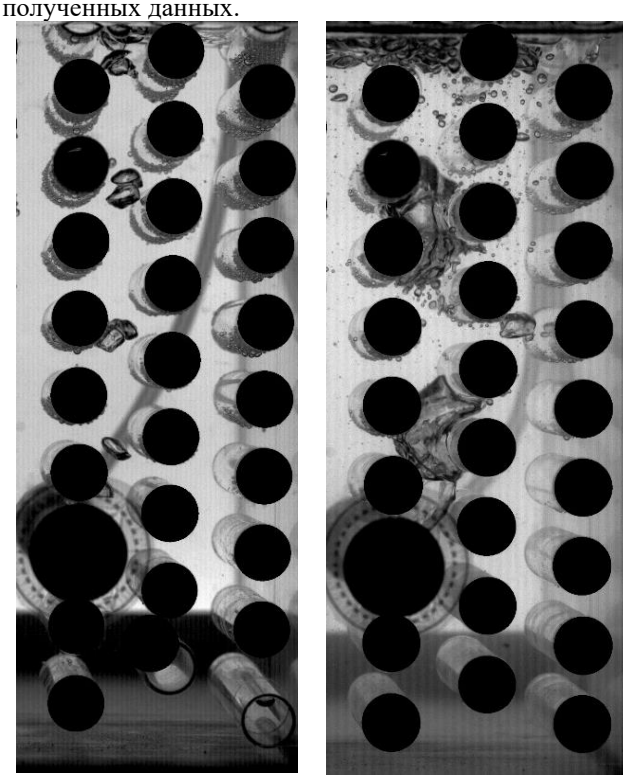
В парогенераторах ядерных энергетических установок имеется множество препятствий потоку, таких как трубные доски и т.д. Двухфазный поток становится значительно сложнее, чем хорошо исследованные течения в трубах и каналах. Однако закономерности движения двухфазных потоков не до конца понятны даже для достаточно простых пучков труб.

В данной работе проведено экспериментальное исследование истечения воздуха в воду через отверстие, просверленное в одной из трубок трубного пучка. Модель парогенератора состоит из 48 горизонтальных стеклянных трубок длиной 140 мм, закрепленных с помощью прозрачных трубных досок, изготовленных из оргстекла. Модель была помещена в бассейн, заполненный водой. При инжекции дисперсной фазы производилась съемка процесса с помощью скоростной камеры JET-19 (Kaya Instruments, Хайфа, Израиль) с частотой съемки 500 к/с и продолжительностью записи 2 секунды.

В ходе экспериментов производилось управляемое изменение расхода газовой фазы $Q_г$ в пределах от 100 до 5000 мл/с, и азимутального расположения отверстия истечения относительно горизонтали с шагом 45 градусов. В зависимости от $Q_г$ могут быть реализованы режимы истечения одиночных пузырей или крупных газовых образований с выраженным перемещением газа в соседние ряды труб (см. рис. 1).

Анализ полученных изображений позволяет определить различные закономерности развития двухфазной среды в трубном пучке, и в частности отследить акты дробления пузырей при обтекании трубок. Также может быть проведено отслеживание перехода пузырей между рядами трубок. Для оценки количества газа в разных сечениях экспериментальной модели применяются методы машинного зрения с автоматической обработкой результатов.

В дальнейшем планируется проведение экспериментальных исследований процессов, происходящих при истечении двухфазной среды в жидкометаллический теплоноситель в условиях горизонтального трубного пучка и обобщение полученных данных.



а) б)

Рисунок 1. Фотографии движения двухфазной среды: а - Qг = 100 мл/с; б - Qг = 5000 мл/с

Список литературы:

1. Serizawa, A., Huda, K., Yamada, Y., Kataoka, I., Experiment and numerical simulation of bubbly two-phase flow across horizontal and inclined rod bundles. Nuclear Engineering and Design 1997, 175, 131–146.

УДК 532.5

ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН ДВУХФАЗНОГО ПУЗЫРЬКОВОГО ТЕЧЕНИЯ В КАНАЛЕ С ОДИНОЧНОЙ ПРЕГРАДОЙ

И.А. Евдокименко[1,2], К.А. Филиппский[3], П.Д. Лобанов[1], А. В. Чинак[1], Си-Ахмед Э-К.[2], Джентрик К.[2], Блель В.[2], Легран Д.[2]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] Nantes Université, CNRS, GEPEA, UMR 6144,
44600,France, Saint-Nazaire, 37 bd de l'Université
[3] Новосибирский государственный технический университет,
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Изучение возможности контроля над гидродинамической структурой течения приобретает ключевое значение в контексте оптимизации установок в различных промышленных процессах. Одним из известных способов влияния на гидродинамическую структуру является введение газовых пузырей и изменение их дисперсного состава. К другому способу изменения гидродинамической картины потока является введение в канал различных геометрических структурных элементов. К таким элементам можно отнести различные уступы и преграды, установка в канал которых оказывает значительное воздействие на характеристики потока, в том числе на формирование отрывных зон. Эти зоны представляют собой значительный интерес для исследований, поскольку они влияют на процессы теплообмена и могут способствовать повышению эффективности систем [1,2].

Сложность моделирования отрывных течений обусловлена их неустойчивой структурой и наличием областей обратного течения, что делает их предметом активных исследований, особенно благодаря развитию в области вычислительной техники. Однако недостаток экспериментальных данных, особенно по двухфазным течениям, затрудняет разработку универсальных моделей, способных точно описывать влияние структуры потока на процессы переноса для различных геометрических конфигураций преград и каналов. В литературе отсутствуют данные о влиянии формы и размеров преград, а также состава газовой фазы на теплообмен в двухфазных пузырьковых потоках в прямоугольных каналах. Это подчеркивает важность дальнейших исследований в данной области. Целью настоящего исследования является оценка влияния геометрической формы преград на гидродинамическую структуру пузырькового потока и теплообмен на стенке за преградой

Для проведения эксперимента были подготовлены два идентичных канала. Рабочая установка представляет собой оргстеклянный канал прямоугольного сечения с размерами 200x16x1000 мм. В качестве преград используются прозрачные оргстеклянные ступени прямоугольного, трапециевидного сечения, а также ступени в виде прямоугольной трапеции с высотой преграды $H=8$ *мм*. Рабочей жидкостью является дистиллированная вода. Ввод газа осуществляется через 9 капилляров с диаметром 0,3 мм, размещенных по всей ширине канала. Эксперименты проводились в диапазоне чисел Рейнольдса Re_H, рассчитанному по высоте преграды от 0 до 15000. Расходное газосодержание β варьируется от 0 до 15%.

Для проведения оптических измерений использовались PIV/PLIF и метод теневой съемки.

Для проведения измерений теплообмена был подготовлен теплообменный участок, который представляет собой фольгу из нержавеющей стали с размерами 70x145мм с толщиной 0,2 мм, нагрев которой осуществляется пропусканием через неё электрического тока от источника ($q=10000$ *Вт/м*^{2}$=const$).

Выяснено, что введение преград в канал оказывает значительное влияние на гидродинамическую структуру течения. Сразу за преградой для одно- и двухфазного потока характерно наличие возвратного течения. Тем не менее, ввод пузырей позволяет уменьшить длину этой зоны, что в свою очередь влечет за собой изменения в процессах переноса тепла и массы. Для всех типов преград обнаружено наличие зоны ухудшения теплообмена сразу за преградой, после преодоления которой начинается рост коэффициента теплоотдачи α вплоть до достижения максимума с последующей стабилизацией. Предполагается, что зоны с максимальным значением α соответствует точке присоединения потоков. Стоит отметить, что распределение интенсивности теплопередачи носит схожий характер, как и для одно- так и для двухфазного потока. Также отмечается, что увеличение газосодержание приводит к интенсификации теплообмена по сравнению с однофазным течением жидкости, что является справедливым для преград всех форм. Таким образом величина интенсификации теплообмена может достигать 60%.

Работа выполнена в рамках госзадания ИТ СО РАН.

Список литературы:

1. Terekhov V.I., Yarygina N.I. and Zhdanov R.F. Heat transfer in turbulent separated flow in the presense of high free-stream turbulence // Int. J. Heat Mass Transfer. 2003. Vol. 46, No. 23. P. 4535–4551.
2. Wang, L., Hejcik, J., Sunden, B., PIV Measurement of Separated Flow in a Square Channel With Streamwise Periodic Ribs on One Wall // Journal of Fluids Engineering. 2007. 129, 834–841.

УДК 622.276

КАПИЛЛЯРНОЕ ВЫТЕСНЕНИЕ НЕФТИ ИЗ ГОРНОЙ ПОРОДЫ

Жигарев В. А.[1], Минаков А. В.[1,2], Пряжников М. И.[1], Пряжников А. И.[1]

[1] Сибирский федеральный университет,
660041, Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79
[2] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Спонтанное впитывание основано на явлении капиллярности и относится к качественным методам определения смачиваемости. Нефтенасыщенный природный керн помещают в раствор, находящийся в цилиндре с градуировкой, и измеряют объем и скорость вытесненной нефти [1]. Данный метод не учитывает тот факт, что скорость пропитки зависит не только от смачиваемости, но и от относительной проницаемости, вязкости, поверхностного натяжения жидкостей, а также от структуры порового пространства и начальной водо- и нефтенасыщенности [2]. Кроме того, процесс капиллярной пропитки пласта применяется в рамках проведения лабораторных исследований для определения показателя смачиваемости горных пород, то есть явлений, происходящих на границе двух фаз, одна из которых – твёрдое тело, а вторая – жидкость или газ. Однако, основные факторы, влияющие на прирост коэффициента вытеснения при использовании вытесняющих жидкостей, могут быть разными.

В последние годы нанотехнологии отдельно или в сочетании с традиционными методами увеличения нефтеотдачи показали себя многообещающе [3,4]. В данной работе проведено исследование влияния различных вытесняющих агентов на процесс капиллярной пропитки в сравнении с растворами наносуспензий. В качестве вытесняющих агентов рассмотрены растворы ПАВ, полимеров и наносуспензий. Постановка эксперимента детально описана в нашей работе [4]. Выполнены две серии экспериментов по капиллярной пропитке вытесняющими жидкостями. В первой серии использовался керн (350 мД, пористость 21,6 %), насыщался образцом нефти с вязкостью 4,24 мПа с и плотностью 803,7 кг/м^3, а во второй – керн (440 мД, пористость 21,3 %), насыщался образцом нефти с вязкостью 28,9 мПа с и плотностью 860,9 кг/м^3. В качестве вытесняющих жидкостей были рассмотрены: вода, 0,05 и 0,1 % полимерный раствор полиакриламида А2020, 0,05 и 0,1 % растворы AES, 0,1 % раствор SDS, а также суспензии наночастиц с различной концентрацией (от 0,05 до 0,25 %). Наименьший прирост объёма нефти наблюдался у полимерного раствора. Было получено, что коэффициент вытеснения маловязкой нефти из песчаника водой в результате капиллярной пропитки составил 58 %. При использовании растворов ПАВ и суспензий наблюдается прирост коэффициента вытеснения нефти. Так лучший из рассмотренных растворов ПАВ SDS увеличил скорость капиллярной пропитки на 4 %, а лучшая из рассмотренных наносуспензия 1030 на 3 %. Раствор полимера марки 2020 при этом снизил скорость капиллярной пропитки примерно на 12 %. В серии с более высокой вязкостью нефти влияние добавок проявилось более существенно. Здесь раствор SDS (0,1 масс.%) увеличил скорость капиллярной пропитки на 22 %, наносуспензия со средним размером 10 нм (0,1 масс.%) – на 24%. Проведен анализ факторов, влияющих на коэффициент вытеснения нефти при капиллярной пропитки растворами ПАВ, полимеров и наносуспензий.

Было показано, что в целом по степени положительного влияния на скорость капиллярной пропитки нефтенасыщенных кернов наносуспензии не уступают растворам ПАВ и существенно превосходят растворы полимеров. Наночастицы в дистиллированной воде снижает нефтесмачиваемость поверхности и изменяет силы межфазного натяжения, способствуя вымыванию капиллярно удержанной нефти. Механизм вытеснения нефти наножидкостями на основе наночастиц заключается в том, что при фильтрации одной из основных движущих сил является капиллярная сила, обусловленная капиллярным давлением. Полимерные растворы, в силу своего неньютоновского поведения, показали результат по вытеснению нефти ниже, чем у воды. В случае использования растворов ПАВ основными факторами является смачиваемость поверхности и межфазное натяжение. Как уже было отмечено, ПАВ значительно снижает межфазное натяжение, что является положительным эффектом для увеличения коэффициента вытеснения нефти. Однако применение ПАВ способствует интенсивному образованию водонефтяной эмульсии, которая в дальнейшем может вызвать дополнительные затраты на её разделение нефти.

Список литературы:

1. Feldmann F., Strobel G. J., Masalmeh S. K., AlSumaiti A. M. An experimental and numerical study of low salinity effects on the oil recovery of carbonate rocks combining spontaneous imbibition, centrifuge method and coreflooding experiments // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2020. V. 190. P. 107045
2. Guo X., Semnani A., Ekekeh D. G., Gao Z., Ostadhassan M., Jia H., Fu J., Ying W. Experimental Study of Spontaneous Imbibition for Oil Recovery in Tight Sandstone Cores under High Pressure High Temperature with Low Field Nuclear Magnetic Resonance. // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2021. V. 201. P. 108366.
3. Liang T., Hou J.-R., Qu M., Xi J.-X., Raj I. Application of nanomaterial for enhanced oil recovery // Petroleum Science. 2022. V. 19. No. 2. P. 882-899.
4. Pryazhnikov M.I., Zhigarev V.A., Minakov A.V., Nemtsev I.V. Spontaneous imbibition experiments for enhanced oil recovery with silica nanosols //Capillarity V. 10 No.3. P. 73-86

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSRZ-2020-0012).

УДК 532.5

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ЖИДКОСТИ НА РАЗВИТИЕ КОЛЬЦЕВОГО ГАЗОЖИДКОСТНОГО ТЕЧЕНИЯ В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРУБЕ

Здорников С.А.[1,2], Исаенков С.В.[1], Черданцев А.В.[1]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Газожидкостные течения в горизонтальных трубах находят своё применение в теплообменниках, в системах охлаждения, в нефтегазовой промышленности и других отраслях.

В зависимости от расходов жидкости и газа реализуются различные режимы течения. При переходе от стратифицированного к кольцевому режиму происходит подъём жидкости по стенкам канала. За время исследования этой проблемы было выдвинуто три группы гипотез: внутренние течения в газе [1], перенос капель и волновые процессы [2, 3]. Остаётся нерешённой проблема, какой из механизмов играет в этом главную роль.

В данной работе изучена трансформация течения в области перехода стратифицированный-кольцевой газожидкостные потоки со скоростями газа 10-40 м/с и числами Рейнольдса жидкости 60-400 в горизонтальной трубе внутренним диаметром 20 мм. В качестве жидкой фазы выбраны вода, водные растворы глицерина с разной концентрацией (25%, 35% и 50%) и водный раствор бутанола (5%) для того, чтобы выявить особенности развития газожидкостного течения в зависимости от вязкости и поверхностного натяжения жидкости.

Методом количественной визуализации [4] получены изображения течения сбоку, и по ним вычислена с учётом оптических искажений высота подъёма жидкости. Методом лазерно-индуцированной флуоресценции, основанном на яркости (BBLIF), [4] получены пространственно-временные записи толщины жидкой плёнки, с помощью которых найдены её статистические характеристики и исследованы волновые структуры жидкой фазы. Кроме того, в ходе экспериментов дифференциальным манометром был измерен перепад давления.

В предположении, что с ростом шероховатости жидкой плёнки увеличивается перепад давления в аксиальном и азимутальном направлениях, что влечёт за собой поднятие жидкости по стенкам канала и её замыкание в кольцо, произведена попытка связать между собой три характеристики потока: среднюю высоту подъёма жидкости, вариацию толщины жидкой плёнки и осевой перепад давления.

В рамках визуального анализа определены режимы течений и построены режимные карты для каждой жидкости. Обнаружено, что при увеличении вязкости область переходных режимов становится более узкой. В условиях малых расходов жидкости кольцевое течение с вязкой жидкостью устанавливается при меньших скоростях газа.

Замечено, что с ростом вязкости замедляется переход к волнам возмущения (рис. 1). Также подтверждено, что существование волн возмущения не является необходимым условием установления кольцевого режима. Это косвенно свидетельствует о том, что вторичные течения в газовой фазе играют в подъёме жидкости ключевую роль.

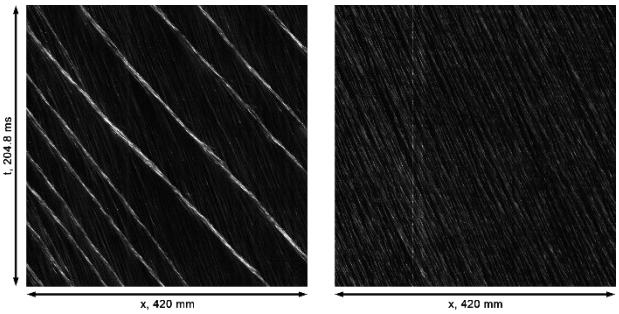


Рис. 1. Толщина плёнки в нижней части канала для воды и водного раствора глицерина 50%
($v_G = 40$ м/с, $Q_L = 5{,}7$ мл/с)

С уменьшением поверхностного натяжения жидкости жидкая плёнка лучше подвергается воздействию газа и жидкость быстрее взбирается по стенкам канала.

Определено, что с увеличением вязкости жидкости и с увеличением её поверхностного натяжения так же, как и шероховатость плёнки, увеличивается аксиальный перепад давления. При фиксированной скорости газа перепад давления прямо пропорционален вариации толщины жидкой плёнки и с высокой точностью квадратично зависит от скорости газа.

Список литературы:

1. Vollestad P., Angheluta L., Jensen A. (2020). Experimental study of secondary flows above rough and flat interfaces in horizontal gas-liquid pipe flow. Int. J. Multiph. Flow, 125, 103235.
2. Fukano, T., Osaka, A. (1989). Prediction of the circumferential distribution of film thickness in horizontal and rear-horizontal gas-liquid annular flow. Int. J. Multiph. Flow, 15 (3), 403-419.
3. Jayanti S., Hewitt G.F., White S.P. (1990). Time-dependent behaviour of the liquid film in horizontal annular flow. Int. J. Multiph. Flow, 16 (6) 1097-1116.
4. Cherdantsev, A.V., Zdornikov, S. A., Cherdantsev, M.V., Isaenkov, S.V., & Markovich, D.M. (2022). Stratified-to-annular gas-liquid flow patterns transition in a horizontal pipe. Exp. Therm. Fluid Sci., 132, 110552.

Гранты: РНФ 19-79-30075

УДК 532.1, 532.3

ДИНАМИКА СФЕРИЧЕСКОГО ТЕЛА ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПРОКАЧКЕ ЖИДКОСТИ В КАНАЛЕ С НЕОДНОРОДНЫМ ВДОЛЬ ОСИ СЕЧЕНИЕМ

Карпунин И.Э.

Лаборатория вибрационной гидромеханики,
Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет,
614990, Пермь, Сибирская, 24

Исследование осцилляционной динамики фазовых включений, возбуждаемой колебаниями жидкости в каналах переменного сечения, и влияния на включения осредненной вибрационной силы важно с технологической и прикладной точек зрения. Разработка и усовершенствование способов управления положением включений и тепломассопереносом в пористых средах и в различных технологических системах имеет большое значение во множестве отраслей промышленности, включая энергетику, химическую и нефтегазовую промышленность, гидротехнике. Сферическое тело рассматривается как модель частицы, которая может колебаться в жидкости, а канал переменного сечения - как модель пористой среды. Практическая значимость данного исследования заключается в применимости результатов в области вибрационной гидромеханики, тепло- и массообмена, фазовых переходов и процессов переноса, а также в разработке и проектировании оборудования для этих процессов.

Рассматриваются основные аспекты взаимодействия сферического тела с жидкостью в осесимметричном канале с неоднородным вдоль оси сечением. Анализируются колебания тела и их влияние на жидкость, а также воздействие неоднородности формы канала на характеристики движения тела. Экспериментально рассмотрена динамика сферического тела, как легкого, так и тяжелого (по отношению к окружающей рабочей жидкости), в осциллирующем потоке жидкости. Колебательное движение столба жидкости оказывает воздействие на сферическое тело, свободно движущееся в вертикальном канале. Силы, действующие на тело, погруженное в жидкость, вместе с осредненной вибрационной силой и потоками приводят к различным эффектам.

В исследовании [1] с осциллирующей жидкостью в канале с периодически изменяющимся диаметром обнаружено, что колебания жидкости с нулевым средним расходом приводят к генерации интенсивных осредненных течений в каждой из ячеек канала. При наличии в канале твердого фазового включения, на фоне интенсивных осредненных потоков жидкости, обнаружено, что колебания жидкости могут привести к полной остановке сквозного движения тела через канал [2]. С повышением амплитуды осцилляций жидкости при фиксированной частоте наблюдается эффект квазистационарного «удерживания» тела в одной из ячеек, при этом тело совершает колебания относительно среднего положения с заданной частотой вибраций (см. рис. 1). Введен параметр, определяющий пороговое значение амплитуды колебания тела, при которой возникает эффект «удержания» тела в квазиравновесном состоянии [3]. В диапазоне рассмотренных безразмерных частот определена структура осредненных течений при наличии тела в вертикальном канале во время колебаний столба жидкости.

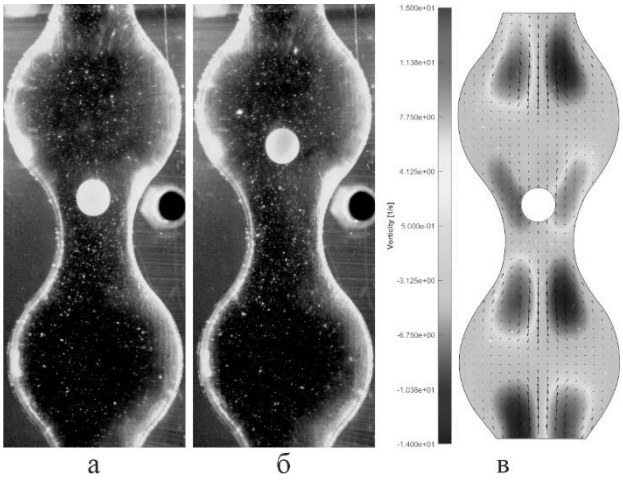


Рис. 1. Фотографии положения тяжелого фазового включения (а, б) в режиме «удержания» с разницей в $t = T/2$ *. Структура осредненного течения (поле завихренности, в) при* $b = 2.6$ *мм,* $f_{vib} = 4$ *Гц и* $\nu = 45.0$ *сСт.*

В экспериментах варьируются амплитуда и частота колебаний столба жидкости, а также физические характеристики рабочей жидкости и размеры тела. Проведены серии экспериментов для легких и тяжелых тел в широком диапазоне параметров эксперимента (амплитуды b, частоты f_{vib} осцилляций жидкости, вязкости жидкости). В качестве рабочих жидкостей выступают водоглицериновые растворы различной концентрации с растворенной солью иодида натрия NaI и силиконовые масла ПМС. Новый обнаруженный вибрационный эффект «удерживания» тела в канале с неоднородным вдоль оси сечением наблюдается как для тяжелых, так и для легких тел.

Список литературы:

1. Vlasova O., Karpunin I., Latyshev D., Kozlov V. Steady flows of a fluid oscillating in an axisymmetric channel of variable cross-section, versus the dimensionless frequency // Microgravity Sci. Technol. 2020. Vol. 32. P. 363–368.
2. Карпунин И.Э. Поведение сферического тела в осциллирующем потоке в осесимметричном канале переменного сечения // Конвективные течения… 2023. №. 11. С. 88–99.
3. Karpunin I. Oscillatory Dynamics of a Spherical Solid in a Liquid in an Axisymmetric Variable Cross Section Channel // Fluid Dyn. Mater. Process. 2024. Vol. 20, №. 4.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (Грант №23-71-01103).

УДК 532.54

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МИГРАЦИИ УГЛЕВОДОРОДОВ С УЧЁТОМ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ СЛУЧАЕВ ГЛУБОКОВОДНЫХ РАЗЛИВОВ

Кильдибаева С.Р.[1], Харисов Э.И. [1], Рафиков Н.Р.[1]

[1] Стерлитамакский филиал Уфимского университета науки и технологий,
453100, Россия, Стерлитамак, пр. Ленина, 37

Исследование особенностей миграции углеводородов, возникающих при техногенных глубоководных утечках, приобретает все большую актуальность в связи с необходимостью прогнозирования потенциальных разливов. Наиболее крупным глубоководным разливом углеводородов считается разлив в Мексиканском заливе, который произошел в 2010 г. [1]

Процесс миграции углеводородов от источника до поверхности водоема включает три этапа: 1) турбулентная струя, 2) шлейф, 3) стадия адвекции-диффузии (см. рис.1). Для моделирования первого и второго этапов используется интегральный Лагранжевый метод контрольного объема (ИЛМКО) [2,3], для третьего этапа разработана модель совместной миграции капель нефти и пузырьков. Математическая модель течения углеводородов включает уравнения сохранения масс, энергии, импульсов, а также дополнительные уравнения, описывающие процессы образования гидрата, вовлечения воды, стесненной миграции углеводородов и т.д.

Миграция углеводородов может сопровождаться образованием гидратной оболочки на поверхности пузырьков в случае, когда давление и температура окружающей среды соответствуют условиям стабильного существования гидрата. С учётом условий окружающей среды пузырьки могут быть газовыми, композитными (состоящими из газового ядра и гидратной оболочки) и гидратными.

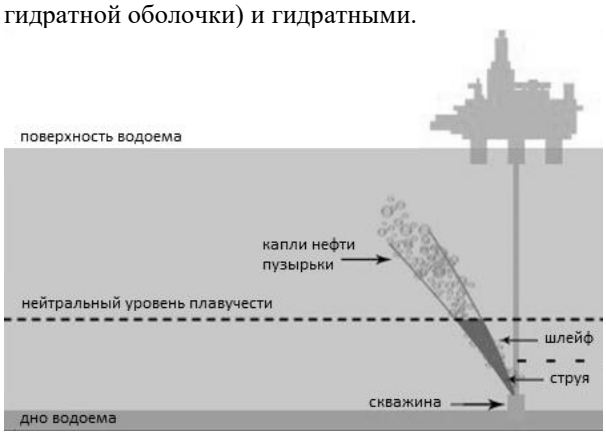


Рис.1. Схема миграции углеводородов

Для описания гидратообразования на поверхности пузырьков рассмотрены две предельные схемы: 1) гидаратообразование лимитируется теплообменом с окружающей средой; 2) гидаратообразование лимитируется диффузионным переносом газа через гидратную оболочку. Вычислительные эксперименты показали, что процесс гидратообразования начинается с момента охлаждения углеводородов до равновесной температуры на этапе течения в виде турбулентной струи [4]. Завершение гидратообразования относится ко второму или третьему этапу течения в зависимости от схемы гидратообразования.

Для полученной математической модели проведены вычислительные эксперименты с параметрами течения и окружающей среды, соответствующими условиям разлива в Мексиканском заливе и полевого эксперимента в Норвежском море. В качестве газа рассмотрен метан и природный газ (80% метана, 10% пропана и 10% этана). Получены траектории миграции углеводородов, зависимости температуры, скорости, массы образовавшегося гидрата от вертикальной координаты.

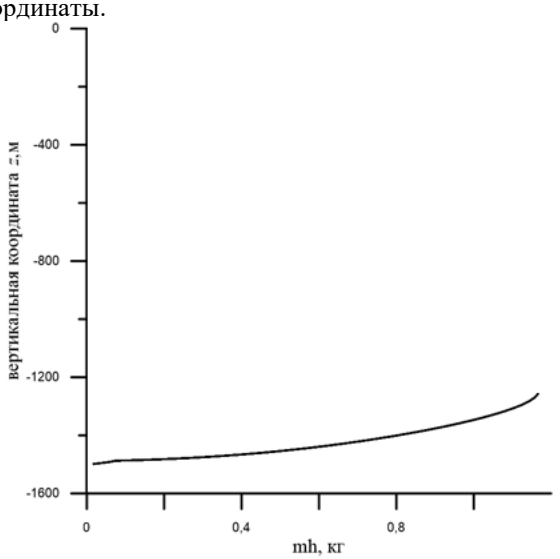


Рис.2. Масса образовавшегося гидрата при объемных расходах нефти Q_o^e=0.5 кг/м^3 и воды Q_g^e=0.5 кг/м^3, радиусе источника r=0.1 м, глубине 1500 м, температуре воды $T_w = 4^o C$, начальной температуре углеводородов $T = 80^o C$, радиусе капель $a = 10^{-3}$ м.

Список литературы:

1. Fleeger J.W. Riggio M.R., Mendelssohn I.A., Lin Q., Houc A., Deis D.R. Recovery of saltmarsh meiofauna six years after the Deepwater Horizon oil spill // Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. № 502. 2018. P.182-190.
2. Zheng L., Yapa P.D., Chen F. A model for simulating deepwater oil and gas blowouts – part I: theory and model formulation // Journal of hydraulic research. 2002. V. 41, № 4. P. 339–351.
3. Гималтдинов И.К., Кильдибаева С.Р. Модель затопленной струи с учетом двух предельных схем гидратообразования // Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25, № 1 (109) . С. 79-88.
4. Кильдибаева С.Р., Гималтдинов И.К.Динамика многофазной затопленной струи с учетом образования гидратов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2015. Т. 1, № 3. С. 92-101.

УДК 532.546

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ МИКРО- И МАКРОМАСШТАБНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ВЫТЕСНЕНИЕ ВЯЗКОЙ НЕФТИ ВОДОЙ В ДВУХСЛОЙНОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

Кузнецов В.В.

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

В последнее время в эксплуатацию вводятся сложно-построенные месторождения нефти, которые характеризуются слоистостью коллектора и малой проницаемостью. Для освоения таких месторождения необходимо решить ряд проблем, снижающих нефтеотдачу, в особенности, для высоковязкой нефти, и обосновать технологии заводнения, использующие микромасштабные капиллярные эффекты, способствующие более равномерному движению фронта вытеснения. Численные расчеты [1] показали, что в слоистой пористой среде микромасштабные капиллярные эффекты способствуют выравниванию фронта вытеснения в слоях, что способствует повышению коэффициента извлечения нефти. В данной работе приведены результаты экспериментального исследования вытеснения нефти с повышенной вязкостью водой в двухслойной пористой среде, определены условия квазиоднородного движения фронта вытеснения в слоях с различной проницаемостью.

Эксперименты проводены с использованием цилиндрической модели пористой среды диаметром 0.052 см при отношении поперечного размера к длине H/L= 0,05. Рабочий участок модели заполнялся двумя слоями уплотненного кварцевого песка с различной проницаемостью при пористости примерно 0,4. Для получения однородных слоев виброуплотнение пористой среды проводилось в заполненном водой рабочем участке. Затем участок высушивался, вакуумировался и заполнялся водным раствором NaCl с концентраций 1 г/л с последующим вытеснением углеводородной жидкостью с заданной вязкостью. Для создания гидрофобной пористой среды в качестве модели нефти использовался водоглицериновый раствор, а модели воды – очищенный керосин. Вытеснение модели нефти проводилось при постоянном расходе закачиваемой жидкости, относительные фазовые проницаемости были получены при малых массовых скоростях для стационарного течения, кривые капиллярного давления получены методом полупроницаемой мембраны. Эксперименты проводились для давления на выходе, равного 1 бар и температуре 20 ^{0}C. Коэффициент вытеснения определялся по объему вытесненной нефти до прорыва воды.

На рис. 1 точками приведена зависимость коэффициента вытеснения к моменту прорыва воды от параметра $\varepsilon_H\sqrt{k_*}$ для двухслойной пористой среды. Эксперименты проведены для $k_* = 0{,}46$; $h = 0{,}6$; $\mu_0 = 0{,}12$, точки 1, 2 соответствуют гидрофильному и 3 - гидрофобному кварцевому песку. Здесь $\varepsilon_H = \sigma\sqrt{k_1 m_1}/u_0\mu_1 H$, u_0 – скорость фильтрации на входе, h – относительная толщины малопроницаемого слоя, k_1, m_1 – проницаемость и пористость высокопроницаемого слоя, индекс $*$ показывает отношение проницаемостей слоев, σ – коэффициент поверхностного натяжения. Как видно, при увеличении параметра $\varepsilon_H\sqrt{k_*}$ коэффициент вытеснения нефти, отнесенный к коэффициенту вытеснения для однородной пористой среды, возрастает и может превышать единицу. Это показывает, что капиллярные явления в двухслойной пористой среде при $\varepsilon_H\sqrt{k_*} > 1$ вызывают перераспределение потоков жидкостей в слоях и существенное увеличение коэффициента вытеснения нефти по сравнению с однородной пористой средой.

Аналитически получено выражение для формы фронта вытеснения в высокопроницаемом и малопроницаемом слоях и коэффициента вытеснения к моменту прорыва воды. На рис. 1 приведены рассчитанные коэффициенты вытеснения к моменту прорыва воды для фазовых проницаемостей и функции Леверетта, соответствующих гидрофильному (кривые 1, 2) и гидрофобному (кривая 3) кварцевому песку. Как видно, результаты расчета хорошо соответствуют экспериментальным данным и показывают существенное превышение коэффициента вытеснения по отношению к однородной среде при $\varepsilon_H\sqrt{k_*} > 0{,}5$.

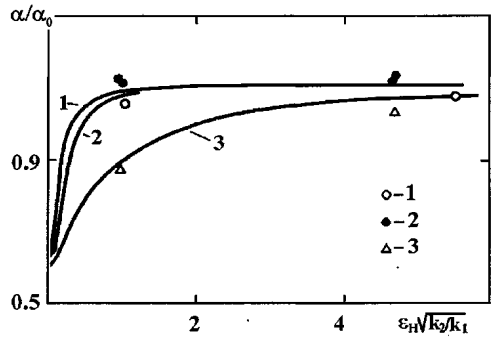


Рис. 1. Зависимость коэффициента вытеснения в момент прорыва воды от параметра $\varepsilon_H\sqrt{k_2/k_1}$. Точки - эксперимент, линии - расчёт для гидрофильной - 1,2 и гидрофобной - 3 пористой среды.

Список литературы:

1. Движение жидкостей и газов в природных пластах / Г.И. Баренблатт, В.М. Ентов, В.М. Рыжик. М.: Недра, 1984. 211 с.

2. Kuznetsov V.V, Safonov S.A. Multi-scale flow patterns during immiscible displacement of oil by water in a layer-inhomogeneous porous media / J. Phys: Conf. Ser. 2021. V. 2119. P. 012048.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН (121031800215-4).

УДК 532.5

ВЛИЯНИЕ УГЛА НАКЛОНА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНОГО ГАЗОСОДЕРЖАНИЯ В ВОСХОДЯЩЕМ ГАЗОЖИДКОСТНОМ ТЕЧЕНИИ В КРУГЛОЙ ТРУБЕ

Гореликова А.Е., Кашинский О.Н., Курдюмов А.С.

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

Проведено экспериментальное исследование структуры восходящего пузырькового течения в трубе круглого сечения. Профили локального газосодержания измерены с помощью точечного датчика электропроводности.

Показано существенное влияние ориентации трубы на локальные характеристики газожидкостного течения. В наклонной трубе происходит значительное увеличение концентрации газовой фазы в верхней части трубы, что приводит к большим пиковым значениям локального газосодержания вблизи стенки

Структура газожидкостного течения в трубах и каналах зависит как от соотношения расходов жидкости и газа, так и от ориентации канала и направления течения. Наибольшая часть экспериментальных исследований двухфазных течений выполнена в вертикальных трубах. Основными режимами течения при малых расходах газовой фазы являются пузырьковый и снарядный, при этом в большинстве случаев течение является осесимметричным.

Исследования газожидкостного течения в наклонных трубах и каналах. проводились во многих работах [1 - 8]. Детально исследовалось движение больших газовых пузыре в наклонных трубах. Было показано, что скорость всплытия одиночного пузыря выше в наклонном канале, чем в вертикальном. Это связано с деформацией носовой части пузыря.

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования локальных характеристик газожидкостного течения в наклонной круглой трубе при различной ориентации относительно вертикали.

Эксперименты проводились на экспериментальной установке, представляющей собой замкнутый по жидкости двухфазный контур.

Рабочий участок представляет собой трубу из оргстекла с внутренним диаметром 36 мм. Рабочий участок состоит из нескольких секций. Общая длина участка составляет 1020 мм. Рабочий участок вместе с подводящей трубой монтируется на подвижной раме, которая может вращаться вокруг оси. Ось вращения распложена вблизи выхода рабочего участка. Подача газа в поток жидкости производилась через 4 капиллярных трубки с внутренним диаметром 0.6 мм. Для измерения локального газосодержания использовался точечный датчик электропроводности. Датчик был вмонтирован в нержавеющую трубку, которая фиксировалась на координатном устройстве. Это позволяло производить перемещение датчика в радиальном направлении. В качестве рабочей жидкости использовался раствор ферри- и ферроцианида калия и карбоната натрия в дистиллированной воде.

Угол наклона рабочего участка изменялся от 10 до 80 градусов. Эксперименты проводились при расходе жидкости 0.443 л/с, что соответствовало приведенной скорости жидкости 0.434 м/с

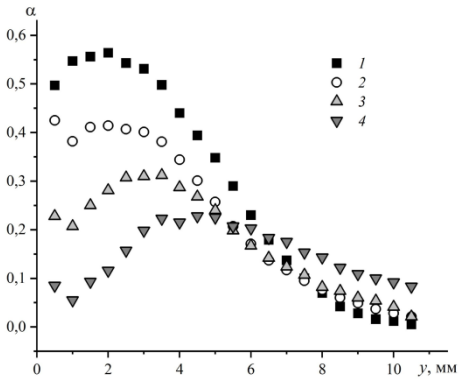


Рис. 1. Зависимость газосодержания α от координаты при различных углах наклона θ 1 – 20°, 2 – 40°, 3 – 60°, 4 – 80°

На рисунке представлены измеренные профили локального газосодержания α при различных углах наклона трубы θ при значении расходного объемного газосодержания 0.039. Координата y отсчитывается от верхней образующей сечения трубы. Максимальное значение локального газосодержания возрастает при уменьшении угла наклона, достигая значения 0.45 при θ = 20°. При этом распределение газосодержания становится уже, газовая фаза концентрируется в пристенной зоне. Координата y, при которой α максимально, меняется от 2.5 до 4.5 мм при увеличении угла наклона.

Список литературы:

1. Barnea D., Shoham O., Taitel Y., Dukler A.E. Gas-liquid flow in inclined tubes. Flow pattern transition in upward flow. Chem. Eng. Sci., 1985, Vol. 40, p. 735-740.
2. Roitberg E., Barnea D., Shemer L. Elongated bubble shape in incline air water slug flow. Int. J. Multiphase Flow, 2016, Vol. 85, P. 76-85.
3. Покусаев Б.Г., Казенин Д.А., Карлов С.П., Ермолаев В.С. Скорость движение газового снаряда в наклонных трубах. ТОХТ, 2011, т. 45, № 5, с. 550-556.
4. Kaipova E.V. Two phase bubble flow in inclined and horizontal channels. J. Eng. Thermophysics, 2003, Vol. 12, No 4, p. 297-311.
5. Sanaullah K., Thomas N.H. Velocity and voidage profiles for steeply inclined bubbly flows in segregated-disperse regime. Experimental and Computational Aspects of Validation in Multiphase Flow CFD Codes, 1994, FED Vol. 180, p. 119-127
6. Sanaullah K., Arshad M., Khan A., Chughtai I.R. Buoyancy effects in steeply inclined air-water bubbly shear flow in a rectangular channel. Thermophysics and Aeromechanics, 2015, Vol. 22, No 4, P. 463-473.
7. Bhagwat S.M., Ghajar A.J. Experimental investigation of non-boiling two phase flow in upward inclined pipes. Exp. Thermal Fluid Sci., 2016, Vol. 79, P. 301 – 318.
8. Кашинский О.Н., Рандин В.В., Чинак А.В. Влияние ориентации канала на теплообмен и трение на стенке в пузырьковом течении. Теплофизика и Аэромеханика, 2013, т. 20, № 4, с

УДК 532.5, 532.526, 532.133, 532.135, 532.137, 66.063.8

РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ И СМЕШЕНИЯ НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДОСТИ В U-ОБРАЗНОМ МИКРОКАНАЛЕ

Лобасов А.С.[1,2], Якимов А.С.[1], Минаков А.В.[1,2], Филимонов С.А.[2]

[1]Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
[2]Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Многие биологические жидкости, такие как кровь, лимфа, спиномозговая и межклеточная жидкости, цитоплазма клеток и др. являются по своим свойствам неньютовноскими псевдопластичными жидкостями. Вследствие этого в клинической практике, а также в лабораторных исследованиях возникает необходимость проведения непрерывного мониторинга вязкостей таких жидкостей. Зависимость вязкости от скорости сдвига является определяющей характеристикой неньютоноских жидкостей. В работе [1] было проведено исследование вихрей Дина в криволинейном микрофлюидном канале и получена методика интерпретации результатов фотометрических наблюдений для численной оценки вязкости ньютоновских жидкостей. Данная методика была применена для оценки вязкости неньютоновских жидкостей. Кроме эксперимента были проведены расчётные исследования в идентичной постановке.

В эксперименте на два входа в канал подавались две одинаковые жидкости, окрашенные в разные цвета, которые затем поступали в изогнутый канал. Были использованы несколько вариантов псевдопластичных жидкостей (Полифлок А2020 и Преастол 2515, 2540).

Для проведения расчётных исследований была построена многоблочная октагональная сетка, повторяющая геометрию микроканала, используемого в эксперименте. Для моделирования гидродинамики использовался метод численного решения системы уравнений Навье-Стокса, дополненный уравнением диффузии.

В результате как экспериментах, так и расчётах было обнаружено, что в неньютоновских жидкостях, в отличие от ньютоновских, вихри Дина заполняют не весь объем канала, образуя достаточно четкую границу со слоем, где поперечные потоки незначительны ввиду большой вязкости. При увеличении скорости прокачки этот слой истончается, и картина течения становится неотличима от ньютоновской жидкости.

Результаты эксперимента приведены на рис. 1, расчёта – на рис. 2.

Полученные сведения могут быть использованы не только для оценки реологических свойств исследуемых образцов, но и для объяснения механизма влияния повышенной вязкости крови на тромбообразование [2].

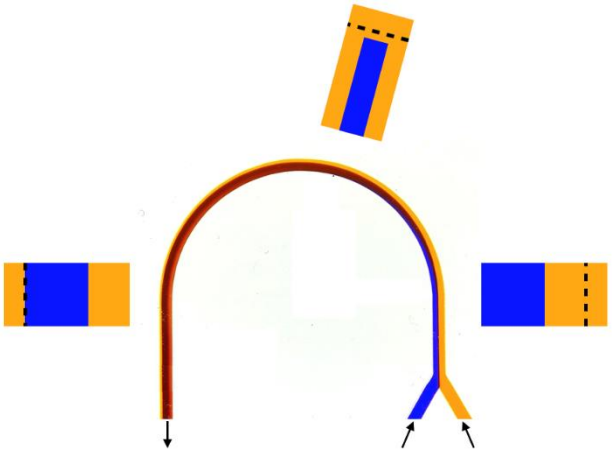


Рис. 1. Экспериментальная картина смешения двух неньютоновских жидкостей в U-образном микроканале

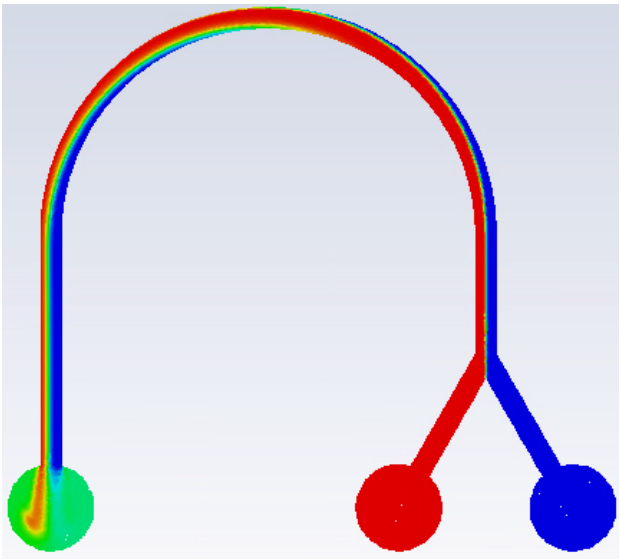


Рис. 2. Расчётная картина смешения двух неньютоновских жидкостей в U-образном микроканале

Список литературы:

1. Pryazhnikov M. I. et al. Fluid viscosity measurement by means of secondary flow in a curved channel //Micromachines. – 2022. – Т. 13. – №. 9. – С. 1452
2. Mackman N. Triggers, targets and treatments for thrombosis //Nature. – 2008. – Т. 451. – №. 7181. – С. 914-918

Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет (номер FSRZ-2020–0012)

УДК 532.542

СПЕКТРАЛЬНЫЙ МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ РЕЖИМОВ ТЕЧЕНИЯ В КОЛЬЦЕВОМ ПОТОКЕ КУЭТТА-ТЕЙЛОРА

Миськив Н.Б., Мамонов В.Н., Назаров А.Д., Серов А.Ф., Терехов В.И.

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

Исследование гидродинамических процессов в кольцевых потоках, возникающих в системах типа Куэтта-Тейлора, имеет важное значение для разработки и оптимизации конструкций электрических машин, теплогенераторов, химических реакторов широко используемых в энергетической, нефтехимической и других отраслях промышленности. Эффективность работы таких устройств напрямую зависит от структуры течения рабочей среды и режимов, реализующихся в кольцевых зазорах между вращающимися цилиндрами. Цифровая регистрация и спектральный анализ пульсаций гидродинамических параметров, таких как момент сопротивления вращению и динамическое давление, открывают возможности для детального изучения вихревой структуры потока и перехода между различными режимами течения [1].

В работе использовалась модель однокольцевой системы Куэтта-Тейлора с вращающимся внутренним цилиндром и неподвижным внешним цилиндрическим корпусом. Экспериментальное оборудование и методы измерения подробно описаны в работах [2,3]. Синхронная регистрация данных осуществлялась с помощью высокоточного тензометрического динамометра для измерения момента сопротивления вращению, высокочувствительного гидрофона собственной разработки и промышленного преобразователя давления СДВ-И для фиксации радиального динамического давления. Эксперименты проводились при постоянной вязкости рабочей жидкости, а число Рейнольдса варьировалось в диапазоне от 582 до 4530 за счет изменения скорости вращения внутреннего цилиндра, охватывая ламинарный, переходный с вихрями Тейлора и турбулентный режимы течения.

В ходе проведенных экспериментов на модели однокольцевой системы Куэтта-Тейлора с помощью спектрального анализа синхронно зарегистрированных данных о пульсациях момента сопротивления вращению внутреннего цилиндра и радиального динамического давления были получены важные результаты. Прежде всего, удалось выделить три характерных частотных диапазона пульсаций. Низкочастотный диапазон 0-50 Гц обусловлен воздействием рельефа поверхности, эллипсности и смещения центра вращающегося цилиндра. Диапазон 50-250 Гц соответствует вихревым и спиралевидным структурам Тейлора, возникающим в переходном режиме течения. Высокочастотный диапазон 250-400 Гц характерен для турбулентного режима течения.

Анализ зависимости мощности пульсаций от угловой скорости вращения цилиндра в выделенных диапазонах показал, что наибольший вклад в генерацию низкочастотных пульсаций вносят особенности рельефа цилиндров. Мощность этих пульсаций в сотни раз превышает мощности в других диапазонах. В диапазоне 50-250 Гц мощность пульсаций плавно нарастает с увеличением угловой скорости, что связано с формированием вихрей Тейлора. Высокочастотные турбулентные пульсации (250-400 Гц) вносят наименьший вклад в общую мощность.

Была обнаружена корреляция между частотами пульсаций момента сопротивления и радиального динамического давления (рис. 1). В диапазонах 50-250 Гц и 250-400 Гц, соответствующих ламинарному течению с вихрями Тейлора и турбулентному режиму, частоты этих пульсаций совпадают с высокой точностью. Это свидетельствует о том, что спектральный анализ синхронных пульсаций указанных параметров позволяет надежно идентифицировать режим течения.

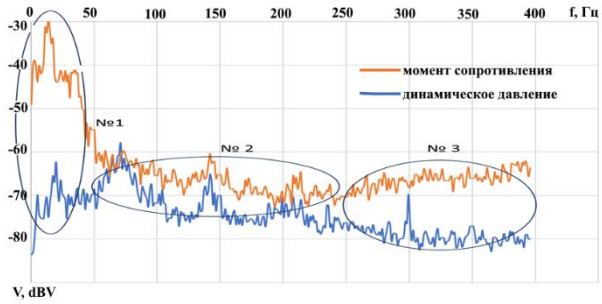


Рис. 1. Частотные диапазоны спектров пульсаций момента сопротивления и динамического давления

Таким образом, в работе продемонстрирована возможность диагностики вихревой структуры и режимов течения в кольцевом зазоре системы Куэтта-Тейлора путем цифровой регистрации и спектрального анализа пульсаций момента сопротивления вращению цилиндра и радиального динамического давления. Полученные результаты открывают перспективы для развития методов исследования сложных гидродинамических процессов в закрытых кольцевых потоках, что востребовано при создании и оптимизации теплогенераторов и аналогичных устройств.

Список литературы:

1. C. David Andereck, S.S. Liu and Harry L. Swinney. Flow regimes in a circular Couette system with independently rotating cylinders//J. Fluid Mech. (1986), vol.164, pp. 155-183.
2. Mamonov V.N., Miskiv N.B., Nazarov A.D. et al. Effect of ribbing of the internal rotating cylinder in the Couette–Taylor system on the value of rotational resistance moment. Thermophys. Aeromech. 30, 637–647 (2023).
3. Н.Б. Миськив, А.Д. Назаров, А.Ф. Серов, В.Н. Мамонов. Автоматизированная система обеспечения исследования структуры течения в многокольцевом потоке Куэтта-Тейлора // Автометрия – 2020. – Т. 56 (3). – С. 101 – 109.

УДК 621.039

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА ЧЕРЕЗ ЯЧЕЙКУ ПОГРУЖЕННОГО ДЫРЧАТОГО ЛИСТА С ПОМОЩЬЮ КОДА OPENFOAM

Мелихов В.И.[1], Никулин А.С.[1]

[1] Национальный исследовательский университет "МЭИ",
111250, Россия, г. Москва, Красноказарменная улица, дом 14

Важным элементом сепарационной схемы горизонтального парогенератора, использующегося на АЭС с ВВЭР, является погруженный дырчатый лист (ПДЛ). ПДЛ это устройство, обладающее высоким коэффициентом гидравлического сопротивления, которое позволяет выравнивать существенно неравномерные по пространству пароводяные потоки, поступающие из трубчатки. По краям дырчатого листа установлена закраина, предназначенная для обеспечения естественной циркуляции пароводяной смеси. ПДЛ с закраиной закрывает сверху трубный пучок как "колпак", зазор между внешней поверхностью закраины и стенкой корпуса играет роль сливного канала, через которое избыток воды с горизонтальной пластины листа поступает в нижнюю часть трубного пучка.

В настоящее время для расчета коэффициента гидравлического сопротивления ПДЛ двухфазному пароводяному потоку используются полуэмпирические соотношения, которые записываются в виде произведения гидросопротивления гомогенной двухфазной смеси, плотность которой определяется объемными долями фаз, и поправки, учитывающей негомогенность потока. Для определения этой поправки необходимы специальные экспериментальные исследования [1]. Тем не менее, помимо экспериментальных методов исследования в настоящее время всё большее место начинают занимать методы компьютерного моделирования с помощью CFD кодов.

В данной работе код OpenFOAM [2] используется для моделирования течения пароводяного потока через отверстие ПДЛ. Сначала было рассмотрено течение однофазного насыщенного пара в одной периодической ячейке ПДЛ для проверки корректности созданной модели. Геометрия расчетной области соответствовала степени перфорации ПДЛ 5,7%. Скорость потока на входе в расчетную область составляет 0,273 м/с, давление насыщенного пара 7 МПа, что соответствовало условиям экспериментов на стенде ПГВ [1].

Было выполнено исследование влияния моделей турбулентности на решение, а также исследование на сеточную сходимость. В качестве контрольных параметров были выбраны перепад давления, возникающий при течении пара сквозь отверстие, и максимальная скорость пара в отверстии. Расчеты проводились на сетках, содержащих 400 тыс., 800 тыс., 1 млн. и 1,5 млн. контрольных объемов, соответственно. Использовались две модели турбулентности k-eps, k-omegaSST. Помимо сравнения результатов моделирования с данными, полученными с помощью других CFD-кодов (FlowVision и Fluent), также было произведено сравнение со значением перепада давления, полученного по корреляции, приведенной в [3], $\Delta P_{\text{Идельчик}} = 980$ Па. Было получено, что наилучшие результаты получаются с использованием модели турбулентности k-omegaSST на самой мелкой сетке.

Вторым этапом исследования стала задача об истечении насыщенного пара через одну ячейку ПДЛ при наличии водяной пленки. Для проведения расчетов была построена трехмерная сеточная модель с общим количеством расчетных ячеек 2.5 млн. Сетка неравномерная и сгущается к стенкам ячейки ПДЛ для возможности моделировать тонкий слой жидкости. Для формирования водяной пленки на внутреннюю поверхность ПДЛ подается вода с постоянным расходом. Моделирование производилось с помощью решателя InterFoam, в котором реализован метод VOF (Volume Of Fluid). Наличие водяной пленки снизило перепад давление на ПДЛ, поскольку она сгладила острые края на входе в отверстие и течение пара сквозь отверстие стало более плавным. Перепад давления на отверстии ПДЛ при течении чистого пара составил 556 Па, а перепад давления для течения пара при наличии водяной пленки – 518 Па. Таким образом наличие водяной пленки уменьшает перепад давления примерно на 7%.

Дальнейшее исследования будут продолжены по двум направлениям: 1) созданная расчетная модель будет использоваться как элемент более сложной расчетной схемы течения среды парогенераторе, 2) проведение моделирования барботажного бака и сопоставление результатов с экспериментальными данными.

Список литературы:

1. Блинков В.Н., Елкин И.В., Емельянов Д.А., Мелихов В.И., Мелихов О.И., Неровнов А.А., Никонов С.М., Парфенов Ю.В. Влияние объемного паросодержания на гидравлическое сопротивление погруженного дырчатого листа // Теплоэнергетика. – 2015. – №7.– С. 24–29.
2. Официальный сайт OpenFOAM: https://www.openfoam.org/ (дата обращения 22.04.2024).
3. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение. –1992. – 672с.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00793, https://rscf.ru/project/22-19-00793/.

Расчеты проводились на вычислительных ресурсах Межведомственного суперкомпьютерного центра Российской академии наук, https://www.jscc.ru /.

УДК 536

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУР СИДЯЧЕЙ КАПЛИ ЖИДКОСТИ НА СТРУКТУРИРОВАННОЙ И ПОРИСТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Пещенюк Ю.А.[1], Гатапова Е.Я.[1]

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

Испарение сидячих капель является фундаментальным явлением, относящимся к широкому кругу практических приложений и теоретических задач. Во многих приложениях способность прогнозировать и контролировать поведение капли во время испарения имеет первостепенное значение. Для экспериментальных исследований испарения сидячих капель в большинстве работ используются оптические методы для регистрации изменения формы капель [1,2]. Особый интерес помимо исследования изменения формы капли, является изучение температурного поля. Развитие бесконтактных методов для измерения температуры поверхности на границе раздела капля-подложка, капля-газ и межфазного теплообмена во время испарения неподвижной капли, включает в себя инфракрасную термографию [3,4], жидкокристаллическую термографию [5] и др. Несмотря на обширный пласт работ по этой теме, многие аспекты, связанные с неизотермическим испарением капель, остаются неясными. Это обусловлено сложностью возникающих процессов тепло- и массообмена, включая конвекцию внутри капли и т.д.

В данной работе исследуется сидячая капля жидкости на нагреваемой подложке. На Рис. 1 представлена схема экспериментальной установки, состоящая из рабочего участка, источника питания, инфракрасной (ИК) камеры FLIR X6530sc и ПК. Рабочий участок состоит из бокса, покрытого поглощающим свет в видимом и инфракрасном диапазоне материалом. На нижней стороне подложки закреплялся тонкопленочный нагреватель с помощью термоскотча. Температура подложки контролировалась термопарой K-типа. Было реализовано две конфигурации для ИК съемки: сверху и сбоку. В качестве подложек были использованы две поверхности с разной структурой: стекло с покрытием Graphite 33 и черный кремний (b-Si). В качестве рабочей жидкости была использована вода Milli-Q и HFE-7100.

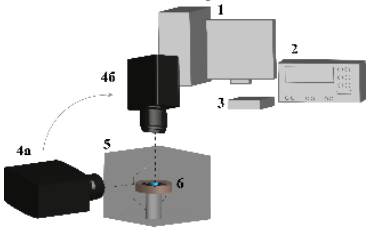
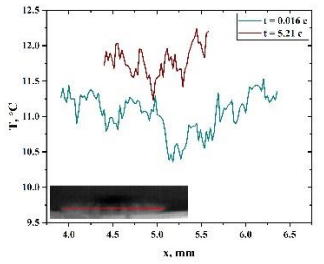
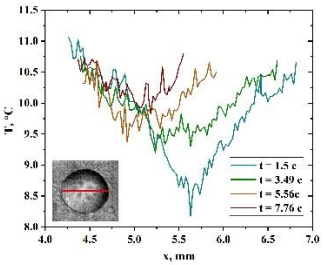


Рис.1. Схема экспериментальной установки: а) съемка сбоку, б) съемка сверху. 1 – ПК, 2 – Источник тока, 3 – АЦП, 4а – тепловизор, 4б – тепловизор, 5 – Бокс, 6 – подложка с нагревателем.

Анализ полученных изображений был проведен в специализированном ПО Flir Altair и ImageJ. Частота съемки варьировалась от 100 до 430 Гц.



а



б

Рис. 2. Распределение температуры в каплях HFE-7100 на подложке b-Si: а) для съемки сбоку при температуре подложки T = 24,9 ℃, б) для съемки сверху при температуре подложки T = 23,2 ℃.

По полученным термограммам было исследовано изменение температурного поля по толщине капли при съемке сбоку и на поверхности капли воды при съемке сверху (Рис.2). Также было отмечено возникновение конвективных течений и пузырей в капля жидкости.

Список литературы:

1. Peschenyuk, Y. A., Semenov, A. A., Ayvazyan, G. Y., Gatapova, E. Y. The final stage of droplet evaporation on black silicon by schlieren technique with a graded filter //Experiments in Fluids. – 2023. – Т. 64. – №. 1. – С. 1.
2. Gatapova, E. Y., Shonina, A. M., Safonov, A. I., Sulyaeva, V. S., Kabov, O. A. Evaporation dynamics of a sessile droplet on glass surfaces with fluoropolymer coatings: focusing on the final stage of thin droplet evaporation //Soft Matter. – 2018. – Т. 14. – №. 10. – С. 1811-1821.
3. Tarozzi L., Muscio A., Tartarini P. Experimental tests of dropwise cooling on infrared-transparent media //Experimental thermal and fluid science. – 2007. – Т. 31. – №. 8. – С. 857-865.
4. Sefiane K., Moffat J.R., Matar O.K., Craster R.V., Self-excited hydrothermal waves in evaporating sessile drops //Applied Physics Letters. – 2008. – Т. 93. – №. 7..
5. Sodtke C., Ajaev V. S., Stephan P. Evaporation of thin liquid droplets on heated surfaces //Heat and mass transfer. – 2007. – Т. 43. – С. 649-657.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 20-19-00722, https://rscf.ru/project/20-19-00722/).

УДК 533

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЧАСТИЦ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ЗА УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

Полянский Т.А[1]., Зайцев А.В.[1]

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

Двухфазные сверхзвуковые течения встречаются в различных сферах деятельности: в промышленности, в аэрокосмической отрасли. Изучение физических явлений, возникающих в таких рода течениях, имеет большую практическую значимость.

Одним из примеров таких течений может служить истечение газа в разреженную среду или вакуум, где при определённых условиях в процессе конденсации формируется двухфазный поток. Хотя истечение и происходит в вакуум, непосредственно в сопле сохраняется континуальный режим течения. Возникает задача переноса продуктов конденсации, которая требует создание соответствующего численного инструмента и его отработки на экспериментальных данных.

Сложность физических процессов, происходящих при взаимодействии дисперсной фазы с высокоскоростным потоком, затрудняет описание явления и создание простых математических моделей.

Основные принципы и подходы описания межфазного взаимодействия предложены в трудах [1], однако теоретические модели оказываются применимы не во всех случаях. В этой ситуации приходится прибегать к различным полуэмпирическим моделям [2,3].

Для валидации численных моделей удобна работа [4], где присутствуют различные режимы взаимодействия газовой и дисперсной фазы.

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования динамики твердых частиц в сверхзвуковом потоке газа за ударной волной (рис. 1).

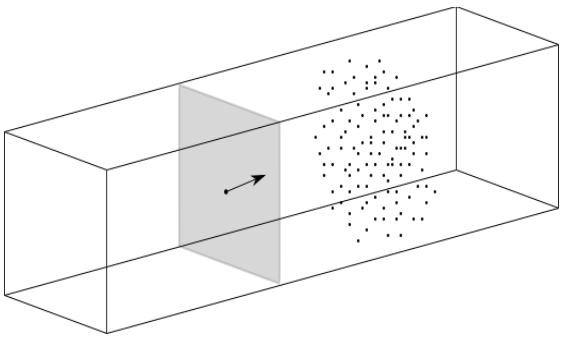


Рисунок 1. Схематическое изображение рассматриваемой задачи.

В качестве методики использовался эйлерово-лагранжев подход [5]. Течения газа описывается уравнениями Навье-Стокса. Дисперсная фаза представлена отдельными частицами, для каждой из которых решается собственное уравнение движения. Обратное влияние на газ моделируется при помощи дополнительных источников членов в газодинамических уравнениях.

Моделирование проводилось при помощи программного обеспечения, разработанного на базе открытой библиотеки OpenFOAM [6].

Исследовано влияние плотности, размера частиц и динамика разгона. Особое внимание уделено исследованию влияния объёмной доли дисперсной фазы на формирование различных режимов течения. Получены параметры перехода от индивидуального обтекания отдельных частиц к формированию групповых структур.

Проведено качественное и количественное сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными [4] для различных параметров частиц дисперсной фазы. Для всех рассматриваемых случаев получено хорошее совпадение.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-19-00750) с использованием ресурсов центра коллективного пользования «Механика».

Список литературы:

1. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. — Наука, 1987.
2. Henderson Charles B. Drag coefficients of spheres in continuum and rarefied flows // AIAA Journal. — 1976. — Vol. 14, no. 6. —P. 707–708.
3. Melosh H. J., Goldin T. J. Heat and Drag Coefficients for Reentry of Impact Ejecta // Lunar and Planetary Science Conference. — 2008. — Mar. — Lunar and Planetary Science Conference. — P. 2457.
4. Shock wave interaction with a cloud of particles / Boiko V. M.,Kiselev V. P., Kiselev S. P., Papyrin A. N., Poplavsky S. V., and Fomin V. M. // Shock Waves. — 1997. — Oct. — Vol. 7, no. 5. — P. 275–285.
5. Gang R., Narayanan C., Subramaniam S. A numerically convergent Lagrangian–Eulerian simulation method for dispersed two-phase flows // International Journal of Multiphase Flow — 2009 — Vol. 35 — P. 376-388
6. OpenFOAM. — URL: https://openfoam.org/

УДК 532.62

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОЛН НА ГРЕБНЕ СТРУИ НА ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВАЕМОЙ ПЛЁНКИ ЖИДКОСТИ

Семионов В.В.[1], Чиннов Е.А.[1]

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

При гравитационном течении плёнок жидкости по нагреваемым поверхностям происходит развитие неустойчивостей и формирование регулярных структур различных типов.

Впервые формирование регулярных структур при вертикальном течении плёнки жидкости описано в работах [1, 2], где исследовалось течение плёнки 25% раствора спирта по нагревателю малого размера 6.5x13 мм. При превышении порогового значения теплового потока на нагревателе формировался горизонтальный вал, что приводило к движению жидкости в виде вертикальных струй и тонкой пленки между ними. В [3] описаны два типа регулярных структур (A и B) в плёнках жидкости, стекающих по нагревателю размером 150x150 мм. В работе [4], где исследовался механизм трансформации развитого волнового течения в термокапиллярно-волновые структуры при числе Рейнольдса Re=10, представлены карты распределения термокапиллярных напряжений, действующих на волны. В области гребня струи эти напряжения имеют значительную компоненту, направленную против движения волн.

Целью данной работы было исследование движения волн по гребню струи на поверхности вертикально стекающей нагреваемой плёнки жидкости.

Экспериментальный стенд представлял собой замкнутый циркуляционный контур, включавший в себя рабочий участок, термостат с насосом, трубопроводы, ротаметр и запорную арматуру. Рабочий участок состоял из текстолитовой плиты и расположенных на ней плёнкоформирователя, термостабилизатора и нагревателя. В качестве нагревателя использовался плоский теплообменник длиной 100 мм и шириной 150 мм, внутри которого по каналам прокачивалась нагретая вода. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода. Рабочая жидкость с помощью насоса подавалась в плёнкоформирователь, который включал накопительную камеру, распределительное устройство и сопло с калиброванной плоской щелью. Более подробное описание установки содержится в [5]. Для определения мгновенного поля толщины и волновых характеристик пленки использован модифицированный флуоресцентный метод, в качестве красителя был выбран Родамин 6Ж. Температура поверхности измерялась инфракрасным сканером Titanium 570M.

Из-за наличия градиента поверхностного натяжения, вызванного неоднородностью температуры, при прохождении волны по гребню струи на неё действуют термокапиллярные напряжения, направленные против её движения. Было установлено, что если друг за другом перемещаются две волны, вторая движется быстрее, чем первая, так как напряжения, действующие на вторую волну, меньше, чем действующие на первую. Вследствие этого, и расстояние между волнами сокращается (см. рис. 1), что, в конечном итоге, может привести к их слиянию.

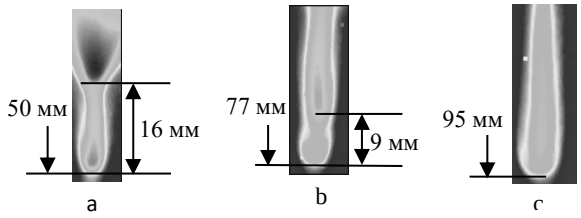


Рис. 1. Положение двух последовательных волн на гребне струи в разные моменты времени (a, b) и их слияние (c). a – t=0 c, b – t=0.06 c, c - t=0.1 c. Слева указано расстояние от фронта первой волны до верхнего края нагревателя, справа – дистанция между передними фронтами волн. Re=33, T_0=23°C, q=1.29 Вт/см^2.

При возрастании теплового потока частота таких слияний уменьшается. Это объясняется более интенсивным прогревом плёнки, в том числе и в области струи, и, как следствие, увеличением термокапиллярных напряжений, действующих на вторую волну.

Полученные результаты имеют значение для понимания развития кризисных явлений в плёнке жидкости.

Список литературы:

1. Кабов О.А. Теплоотдача от нагревателя с малым линейным размером к свободно стекающей пленке жидкости // Тр. Первой Росс. нац. конф. по теплообмену. М.: Изд-во МЭИ. 1994. Т. 6. С. 90-95.
2. Kabov O.A., Diatlov A.V., Marchuk I.V. Heat transfer from a vertical heat source to falling liquid film // Proc. of the First Int. Symp. on Two-Phase Flow Modeling and Experimentation. / Eds. G.P. Celata and R.K. Shah. 9-11 October, 1995. Rome, Italy. Vol.1. P. 203-210.
3. Чиннов Е.А., Кабов О.А. Формирование струйных течений при гравитационном стекании волновой нагреваемой плёнки жидкости // ПМТФ, 2003, Т. 44, № 5, С.128-137.
4. Chinnov E.A., Shatsky E.N. Destruction of waves and formation of rivulets on the surface of a heated liquid film at Re = 10 // Int. J. Multiphase Flow 2019 V. 120, 103106.
5. Chinnov E.A. Formation of the unsteady thermocapillary structures in the residual layer of three-dimensional waves // Int. J. Heat Mass Transfer 2017 V. 108 P. 2053–2059.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН № 122022800489-6

УДК 533.6

ДРОБЛЕНИЕ КАПЕЛЬ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ПОТОКЕ ВОЗДУХА

Сыродой С.В., Замалтдинов Р.Р.

Томский политехнический университет
630050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30

Перспективность внедрения водоугольного топлива в общий баланс тепло- и электрогенерации обоснована уже достаточно давно (например, [1]). Показано (по результатам экспериментальных [2] исследований), что при сжигании водоугольных топлив образуется значительно меньше оксидов серы и азота.

Но при всех преимуществах водоугольных технологий они имеют ряд значимых недостатков. Самым существенным из таковых считаются высокие значения времен задержки зажигания (до 15 секунд) типичных капель водоугольного топлива [3]. По результатам проведенных ранее экспериментальных исследований [4] установлено, что при распылении ВУТ образуются капли преимущественно с характерным размером от 1 до 3 мм. Времена задержки зажигания таких относительно крупных капель (даже при достаточно высоких температурах внешней среды Tg≥1273 K) составляет от 5 до 15 секунд (в зависимости от марки угля). На настоящее время разработаны и продолжают разрабатываться системы распыления водоугольного топлива, позволяющие формировать мелкодисперсный поток капель ВУТ. Однако, надежность таких систем не высока вследствие высокого эрозийного износа форсуночных аппаратов.

Цель данной работы – установление критических значений числа Вебера в потоке воздуха при движении капель ВУТ в одном направлении с потоком воздуха при варьировании фракционного состава топлива.

Рис. 1. Экспериментальный стенд: 1 - инфузионный шприцевой насос, 2 – источник света, 3-электродвигатель, 4 - центробежный вентилятор, 5 – держатель со шприцом, 6 – персональный компьютер, 7 – высокоскоростная камера, 8 – сопло.

Экспериментальные исследования проводились на стенде, схема которого приведен на рисунке 1. Основной частью экспериментального стенда было плоское специально спрофилированное сопло. Сечение последнего на входном участке составляло 350х20 мм, в выходном участке 20х20 мм. Длина соплового канала: L=180 мм. Противолежащие стенки сопла были выполнены из прочного стекла, с одной стороны которого устанавливался источник монохроматической плоской световой волны. С обратной стороны была установлена высокоскоростная видеокамера (Evercam 1000 - 32M с объективом Sigma AF 105mm f/2.8 EX DG OS HSM Macro). Сопловой канал через карман Рихтера подключался к центробежному вентилятору ВЦ5. Последний приводился в движение с помощью электродвигателя АДМ80И2У3, мощностью 2,2 кВт.

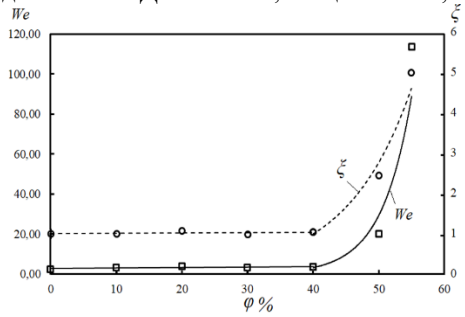


Рис. 2. Зависимость критического числа Вебера и относительной скорости витания капли $\xi = |V_g - V_d|/V_g^0$ (где: V_g, V_d – скорости воздуха и капли в зоне ее разрушения, V_g^0 – скорость воздуха на входе в сопловой аппарат, $V_g^0 = 7$ м/с) от концентрации угольной компоненты в топливной капле.

На рисунке 5 приведены зависимости критического числа Вебера (We) и относительной скорости капли в момент разрушения (ξ) от концентрации угольной компоненты в топливе. Можно отметить, что зависимости We(φ) и $\xi(\varphi)$ имеет характер типа «хоккейная клюшка». Последнее обусловлено тем, что как уже говорилось выше при переходе через значения φ≥50% скачкообразно меняются характеристики дробления капель ВУТ. Последнее обусловлено тем, что в этих условиях частицы угля в суспензии начинают играть роль связующего материала, что приводит к существенному росту сил вязкости и сил поверхностного натяжения и, соответствующему изменению условий диспергирования капля.

Исследование выполнено за счет грантов РНФ (проект № 23-79-10092)

Список литературы:

1. Зола и шлак при сжигании водоугольных суспензий / Бутылькова Т.Н., Делягин Г.Н. // Новые метогды сжигания топлива и вопросы теории горения. – М.: Наука, 1969. - С.58-64.
2. Зажигание капли композиционного жидкого топлива в вихревой камере сгорания / Валиуллин Т.Р., Вершинина К.Ю., Глушков Д.О., Стрижак П.А. // Современные проблемы теплофизики и энергетики: Материалы Международн. конф., - Москва, 9-11 окт. 2017. – Москва. 2017. - С.105-106.
3. Ignition and combustion characteristics of coal - water fuels based on coal & semi-coke / Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Salomatov V.V., Malyshev D.Y., Kostoreva Z.A., Purin M.V., Yankovsky S.A. // Combustion and Flame. – 2022. – V. 246. – P. 112430.
4. Visualization study on breakup modes of coal water slurry in an impinging entrained-flow gasifier / Zhicun Xue, Yan Gong, Qinghua Guo, Fuchen Wang, Guangsuo Yu. // Fuel. – 2019. – V. 244. – P. 40-47.

УДК 532.529.5

ОБ АДДИТИВНОСТИ СОБСТВЕННОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ЖИДКОСТИ И ПУЗЫРЬКОВОЙ ПСЕВДОТУРБУЛЕНТНОСТИ В ВОСХОДЯЩЕМ ТЕЧЕНИИ В ТРУБЕ

Тимкин Л.С.[1], Горелик Р.С.[1]

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

Пузырьковые течения могут значительно увеличивать тепло- и массообмен в различных индустриальных аппаратах. Предсказание характеристик течения требует создания корректных моделей турбулентности. Одной из ключевых проблем моделирования является существование в течении собственной турбулентности жидкости и наведенной пузырьками псевдотурбулентности. Взаимодействие этих двух компонент двухфазной турбулентности является существенно многопараметрической задачей и на настоящий момент недостаточно выяснено, несмотря на то, что изучению этих течений посвящено большое количество работ.

Аддитивность собственной турбулентности жидкости и пузырьковой псевдотурбулентности была предложена в [1]. В дальнейшем это предположение многократно использовалось для развития моделей различных двухфазных течений. Предположение многократно обсуждалось и тестировалось [2, 3, 4], но области его применимости до сих пор четко не определены.

Для измерения напряжения трения на стенке трубы использовался электродиффузионный метод [5]. Эксперименты проводились в вертикальной трубе, внутренним диаметром D = 14.8 мм и высотой 6.0 м. Пузырьковое течение формировались в генераторе пузырей на входе в трубу. Измерительный блок с электродиффузионными датчиками был установлен на высоте 5 м от входа в трубу. Восемь двойных датчиков, равномерно расположенных в одном сечении по периметру трубы, использовались для регистрации знакопеременного напряжения трения на стенке трубы. Датчики подключены к компьютеру через индивидуальные усилители и 16-битный амплитудный преобразователь АЦП L-Card 1620-S. Ошибка измерения однофазного трения на стенке была в пределах 5 ÷ 7%. Ферри- и ферроцианидный растворы с добавками глицерина использовались как рабочая жидкость. При температуре 20 ± 0.2°C, кинематическая вязкость растворов составляла $\nu = 1.1\cdot10^{-6}$ м^2/с и $3.5\cdot10^{-6}$ м^2/с.

Для течения с пузырьками диаметром 1.1 мм осреднённое по 8 датчикам напряжение трения на стенке и пульсации напряжения трения представлены на Рис. 1. Число Рейнольдса пузыря по скорости всплытия в большом объеме равно 104.

Для этих пузырьков данные показывают, что в области одновременного наличия в течении собственной турбулентности жидкости и псевдотурбулентности взаимодействие пульсаций имеет более сложный характер, чем предложенный в [1]. При числе Рейнольдса течения - Re > 1800 четко выражено не-аддитивное сочетание пульсаций, при котором турбулентность течения практически полностью определяется собственной турбулентностью жидкости. Вклад псевдотурбулентности сводится лишь к небольшой добавке в общие пульсации.

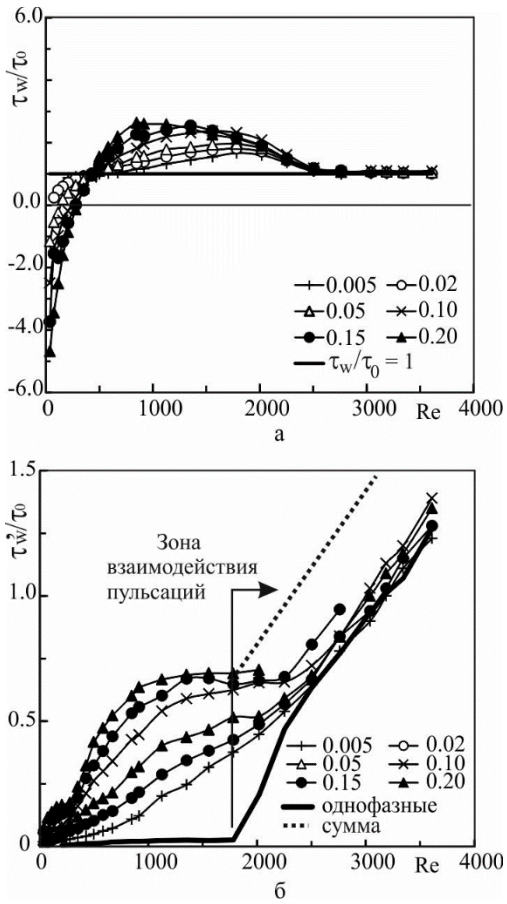


Рис. 1. Среднее по периметру трубы напряжение трения на стенке - а) и его соответствующие пульсации - б). Вязкость рабочей жидкости $\nu = 3.5\cdot10^{-6}$ м^2/с. Цифрами в легенде указаны величины объемного газосодержания потока. Однофазные пульсации и сумма однофазных и псевдотурбулентных пульсаций трения для высоких объемных газосодержаний показаны отдельными сериями.

Список литературы:

1. Sato Y., Sekoguchi K. Liquid velocity distribution in two-phase bubble flow// Int. J. Multiph. Flow. 1975. Vol. 2. Pp. 79-95.
2. Lance M., Bataille J. Turbulence in the liquid phase of a uniform bubbly air-water flow// J. Fluid Mech. 1991. Vol. 222. Pp. 95-118.
3. Gore R.A., Crowe C.T. Effect of particle size on modulating turbulence intensity// Int. J. Multiph. Flow. 1989. Vol. 15. Pp. 279-285.
4. Vaidheeswaran A., Hibiki T. Bubble-induced turbulence modelling for vertical bubbly flows// IJHMT. 2017. Vol. 115. Pp. 741-752.
5. Электродиффузионный метод исследования локальной структуры турбулентных течений / В.Е. Накоряков, А.П. Бурдуков, О.Н. Кашинский и др.; Под ред. В.Г. Гасенко. Новосибирск: Институт теплофизики, 1986. 247 с.

УДК 532.613.4

ДВИЖЕНИЕ КЛАСТЕРА МОНОДИСПЕРСНЫХ КАПЕЛЬ МАСЛА В ДИСТИЛЛИРОВАННОЙ ВОДЕ

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

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

Задача о движении кластера деформируемых частиц дисперсной фазы (капель или пузырьков) в жидкости является актуальной при решении задач как теоретического, так и прикладного значения. Для варьирования физико-химических свойств исследуемой дисперсной системы в жидкость вводят поверхностно-активное вещество [1]. Например, в фармацевтической индустрии поверхностно-активные вещества применяются для создания жидких препаратов с улучшенным усвоением, в пищевой промышленности – для создания эмульсий в пищевых продуктах, таких как соусы и молочные напитки, в косметической промышленности – для обеспечения однородности и стабильности кремов, мазей и др. Для повышения эффективности описанных технологических процессов следует иметь детальное представление о динамике взаимодействия дисперсной фазы и дисперсионной среды в зависимости от различных характеристик рассматриваемого процесса, в частности, от коэффициента межфазного (или поверхностного) натяжения на границе раздела фаз.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования процесса всплытия кластера монодисперсных капель изопарафинового масла в дистиллированной воде в присутствии и в отсутствие поверхностно-активного вещества (лаурилсульфат натрия).

Результаты экспериментов получены в следующем диапазоне определяющих и определяемых параметров: диаметр капель в кластере d=(3÷6.6) мм, начальный диаметр кластера D=(6.5÷11) см, равновесный коэффициент межфазного натяжения σ=(2.2÷20.2) мН/м, плотность капель масла ρ_p=826 кг/м^3, плотность дистиллированной воды ρ=1000 кг/м^3, коэффициент динамической вязкости капель масла μ_p= 17.4 мПа·с, коэффициент динамической вязкости дистиллированной воды μ=1.05 мПа·с, скорость центра масс кластера капель u=(9.8÷13.5) см/с, количество капель в кластере N=(31÷99) капель, число Рейнольдса $\mathrm{Re}=\rho_l u d/\mu_l$=(200÷800), начальная объемная концентрация капель в кластере C_V=(0.0005÷0.01), концентрация поверхностно-активного вещества C=(0.1÷3.2) ммоль/л.

Эксперименты проведены на установке, состоящей из кюветы с плоскопараллельными стенками, изготовленными их стекла, устройства для создания компактного кластера капель, равномерно распределенных в объеме жидкости и системы визуализации исследуемого процесса. Размер кюветы с жидкостью (300x300x900 мм) обеспечивал проведение исследований по всплытию кластера без влияния ее стенок на скорость капель.

В работе получены экспериментальные данные по общей картине движения кластера капель в зависимости от начальной объемной концентрации капель. Получены экспериментальные значения скорости кластера капель в зависимости от числа Рейнольдса.

Анализ динамического взаимодействия капель в кластере, а также закономерностей движения изначально сферического кластера капель в целом в экспериментах проведен до момента распада кластера. Началом распада кластера рассматривается момент, когда кластер движется со скоростью, равной скорости движения одиночной капли.

Анализ экспериментальных данных показал, что при движении капель масла в дистиллированной воде наблюдаются два типа взаимодействия капель друг с другом: контактное (характеризуется наличием столкновений между каплями в кластере и отсутствием коагуляции между ними) и бесконтактное (характеризуется отсутствием столкновений между каплями в кластере) взаимодействие. В исследованном диапазоне чисел Рейнольдса обнаружено, что бесконтактный тип взаимодействия наблюдается при начальной объемной концентрации капель в кластере C_V<0.002 (k=6,4 – безразмерное расстояние между центрами капель), а контактный тип взаимодействия – при C_V>0.002. Данная динамика движения капель не зависит от присутствия/отсутствия поверхностно-активного вещества на межфазной границе.

Проанализировано влияние начальной объемной концентрации C_V кластера монодисперсных капель масла на скорость его движения при наличии и в отсутствие поверхностно-активного вещества на межфазной поверхности. Обнаружено, что в сравнении со скоростью движения одиночной капли скорость движения кластера капель возрастает при фиксированном диаметре кластера по мере увеличения начальной объемной концентрации капель и при фиксированной начальной объемной концентрации капель по мере возрастания диаметра кластера только при бесконтактном типе взаимодействия. При контактном взаимодействии капель динамика кластера меняется – наблюдается уменьшение скорости кластера в сравнении со скоростью движения одиночной капли по мере увеличения величины C_V. Изменение динамики кластера капель при контактном режиме всплытия, по-видимому, связано с уменьшением коэффициента эллиптичности (отношения малой и большой оси эллипсоидальной капли). Данный эффект требует более подробного изучения.

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

Список литературы:

1. Поверхностно-активные вещества: синтез, свойства. Анализ, применение / К.Р. Ланге.; Под ред. Л.П. Зайченко. Санкт-Петербург: Издательство Профессия, 2005. 240 с.

УДК 615.47

ИЗМЕНЕНИЕ ГЕМОДИНАМИКИ АНЕВРИЗМЫ БРЮШНОЙ АОРТЫ В ПРОЦЕССЕ ЕЕ РАСШИРЕНИЯ.

Федотова Я. В.[1], Калачев И. В.[1], Тотмина Е. В. [1], Карпенко А. А. [1], Мулляджанов Р. И.[1, 2]

[1] Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1
[2] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

В настоящее время наблюдается рост числа больных с аневризмами аорты, а наиболее частой локализацией является ее абдоминальный отдел [1]. Аневризма брюшной аорты (АБА) — это патологическое выпячивание просвета брюшной аорты по сравнению с нормальным диаметром на 50% или более. Прогрессирование аневризматического расширения сопровождается увеличением нефизиологической нагрузки на ее стенку. Если напряжение становится достаточно большим, аневризма разрывается, что приводит к смерти почти в 90% случаев. Основным критерием для оценки риска разрыва аневризмы в клинической практике остается максимальный диаметр АБА, однако недавние исследования [2, 3] показали, что существует сильная корреляция между динамикой кровотока и ростом аневризмы. Таким образом, гемодинамические параметры потока в области аневризмы, полученные с помощью методов вычислительной гидродинамики (computational fluid dynamics, CFD), являются перспективными для построения предиктивных моделей роста аневризмы и риска ее разрыва [4].

В работе выполнены персонализированные расчеты кровотока аневризмы брюшной аорты для 40 пациентов с КТ-изображениями в динамике (с временным промежутком 6-18 мес.). Расчеты проводились с помощью ранее разработанного программного комплекса на базе нейронной сети 3D Unet и открытого численного кода OpenFoam [5-6], предназначенного для автоматизации трехмерного моделирования кровотока в области аневризмы. Для 40 пациентов с помощью методов деформируемой регистрации изображений были рассчитаны карты локального роста аневризмы и на основании полученных данных исследована связь между изменением структуры кровотока и ростом АБА. Также был выполнен корреляционный анализ между пристеночными параметрами гемодинамики (TAWSS, OSI, RRT) и распределением локального роста аневризмы.

Список литературы:

1. Хубулава Г. Г., Светликов А. В. Роль внутрипросветного тромба аневризмы брюшной аорты в ее прогрессировании и разрыве //Грудная и сердечно-сосудистая хирургия. 2015. Т. 57. №. 6. С. 4-8.
2. Arzani A., Shadden S. C. Characterizations and correlations of wall shear stress in aneurysmal flow //Journal of biomechanical engineering. 2016. Vol. 138. No. 1. P. 014503.
3. Mutlu O., Onur. How does hemodynamics affect rupture tissue mechanics in abdominal aortic aneurysm: Focus on wall shear stress derived parameters, time-averaged wall shear stress, oscillatory shear index, endothelial cell activation potential, and relative residence time //Computers in Biology and Medicine. 2023. P. 106609.
4. Baek S., Arzani A. Current state-of-the-art and utilities of machine learning for detection, monitoring, growth prediction, rupture risk assessment, and post-surgical management of abdominal aortic aneurysms //Applications in Engineering Science.2022. P. 100097.
5. Epifanov R. UI , Nikitin N.A., Rabtsun A.A., Kurdyukov L.N., Karpenko A. A., Mullyadzhanov R.I. Adjusting U-Net for the aortic abdominal aneurysm CT segmentation case//Computer optics.2024.V.48. № 3.
6. Fedotova Y. V. et al. Automatically hemodynamic analysis of AAA from CT images based on deep learning and CFD approaches //Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2021. Vol. 2119. No. 1. P. 012069.

Работа выполнена при поддержке Математического Центра в Академгородке, соглашение с Министерством науки и высшего образования Российской Федерации №075-15-2022-282.

УДК 532.6

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА С ВОДЯНЫМ ПАРОМ ВНУТРИ ФОРСУНКИ С ПРОТИВОВРАЩЕНИЕМ

Жерибор М.О.[1], Хребтов М.Ю.[1]

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

Испарение жидкого топлива является важным процессом для многих индустриальных приложений. В зависимости от приложения, в этом процессе могут наиболее важными различные характеристики (максимальный расход топлива, скорость капель, состав спрея, и т.д.). В ряде приложений наиболее важным является обеспечение максимальной однородности и контроля состава смеси при небольших расходах топлива. К таким приложениям относится каталитический риформинг топлива [1-3], когда смесь паров топлива, перегретого водяного пара и кислорода попадает на катализатор, где происходит цепочка химических реакций.

Для данных приложений необходима разработка новых типов форсунок для подачи топлива, учитывающих особенности работы данных устройств. Небольшой расход топлива приводит к снижению числа Рейнольдса в потоке и ослаблению перемешивания, что создает необходимость изменения конструкции форсунки для создания в ней гидродинамических неустойчивостей. В качестве одного из способов создания таких неустойчивостей можно использовать эффект противовращения потока, когда часть потока закручивается в одну сторону, а другая часть – в другую. При контакте двух таких частей образуется слой смешения, где происходит интенсивное развитие неустойчивостей и формирование когерентных вихревых структур.

В данной работе численным методом был исследован прототип форсунки для риформера дизельного топлива, используемого для получения синтез-газа. Модель форсунки была создана на основе предыдущих исследований [4], но с рядом упрощений, позволяющих производить данные форсунки на станках с ЧПУ.

Данная модель имеет два подводящих канала, создающих две области внутри форсунки с разными направлениями вращения (Рис.1), и зону рециркуляции, где происходит перемешивание потока. Через входные каналы подводится смесь жидкого топлива (гексадекан) и перегретого водяного пара с температурой 450 °C. Диаметр подводящих каналов составляет 1 мм. Расход водяного пара задавался равным 350 г/час. Расход топлива составлял 150 г/час.

Внутри форсунки происходит образование слоя с сильным сдвигом в области между струями с разным направлением закрутки, где происходит сворачивание слоя смешения и интенсивное вихреобразование. Вихри далее попадают в область рециркуляции, где, взаимодействуя между собой, дополнительно увеличивают степень перемешивания топлива с водяным паром в потоке.

Моделирование проводилось в открытом пакете OpenFoam (www.openfoam.com). Для газовой фазы разрешались уравнения Навье-Стокса в сжимаемой постановке. В связи с малым числом Рейнольдса в потоке ~1000 расчет проводился без явного задания модели турбулентности. Жидкая фаза моделировалась в как монодисперсный поток капель в лагранжевом представлении. Исследовался процесс испарения капель в зависимости от их диаметра. Получены хорошие показатели степени испарения топлива, до 80% по массе на выходном сечении сопла, что говорит об эффективности данной конфигурации форсунки.

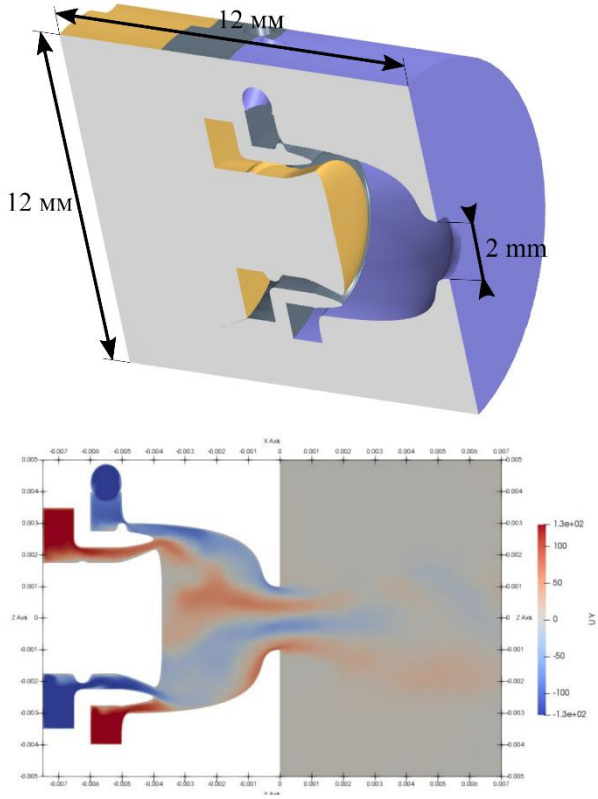


Рисунок 1. (а,б) – геометрия форсунки,(в) – поле окружной скорости

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

Список литературы:

1. Zazhigalov S. V. et al. Simulation of diesel autothermal reforming over Rh/Ce0. 75Zr0. 25O2-δ-ηAl2O3/FeCrAl wire mesh honeycomb catalytic module //Chemical Engineering and Processing-Process Intensification. – 2020. – Т. 150. – С. 107876.
2. Porš Z. et al. Optimised mixture formation for diesel fuel processing //Fuel cells. – 2008. – Т. 8. – №. 2. – С. 129-137.
3. Pasel J. et al. Recent advances in diesel autothermal reformer design //International journal of hydrogen energy. – 2020. – Т. 45. – №. 3. – С. 2279-2288.
4. Hrebtov M. Y., Zheribor M. O., Mullyadzhanov R. I. Numerical investigation of diesel fuel spray in a nozzle with counter-swirling jets //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2023. – Т. 459. – С. 04018.

УДК 532.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ В ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ФОРСУНКЕ

Хребтов М.Ю.[1], Вожаков И.С.[1], Муллядженов Р.И.[1]

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

Для современных двигателей внутреннего сгорания и энергетических установок необходимы высокая эффективность сжигания топлива, относительно низкий уровень вредных выбросов и надежность работы. Улучшить эффективность работы и понизить интенсивность вредных выбросов может использование многокомпонентных жидких топлив. При этом, компоненты топлива могут быть нерастворимыми друг в друге и образуют границы раздела в потоке. Для обеспечения однородности смеси (образования эмульсии) необходимо воздействие на поток с целью перемешивания компонент топлива.

В конструкции камер сгорания часто используются центробежные форсунки для распыла жидкого топлива. Внутри форсунок происходит закрутка и перемешивание топлива, подводимого во внутренний объем через различные каналы. Естественной модификацией таких форсунок для многокомпонентных топлив является подача различных компонент топлива через разные каналы. Однако, в зависимости от конструкции, форсунки могут не обеспечивать необходимую степень перемешивания различных компонент топлива, что будет приводить к распаду исходной струи на две или более, в каждой из которых будет преимущественно содержаться одна компонента топлива.

В данной работе численным методом с помощью кода Basilisk [1,2] было выполнено моделирование перемешивание двухкомпонентного топлива (в качестве компонент использовались вода и керосин с объемными расходами 0.5 л/мин) в центробежной форсунке с двумя подводящими каналами (рис.1, слева). Моделирование проводилось методом VOF в конечно-объемной постановке. Для фильтрации мелкомасштабных пульсаций применялся LES метод по модели Vreman [3].

В результате расчетов было обнаружено, что в исходном варианте геометрии вытекающая из выходного сопла струя жидкости распадается на две струи с разными компонентами топлива из-за недостаточного перемешивания компонент между собой.

Была предложена модификация конструкции форсунки (рис.1, справа), состоящая во внесении в поток каждого подводящего канала цилиндрических препятствий, что с одной стороны увеличивает турбулентную диффузию за счет увеличения локального числа Рейнольдса, а с другой стороны создает в потоке периодические осцилляции по механизму, аналогичному дорожке Кармана.

Такая модификация привела к существенному улучшению степени перемешивания смеси внутри форсунки и более однородным характеристикам вытекающей струи и образующегося из нее спрея.

Из-за увеличения внутреннего трения у модифицированной форсунки несколько уменьшилась степень закрутки потока, однако из-за эффектов поверхностного натяжения между водой и керосином распад струи происходил на более раннем этапе, чем в исходной форсунке.

Таким образом, данная модификация является перспективной и будет в дальнейшем исследована в эксперименте.

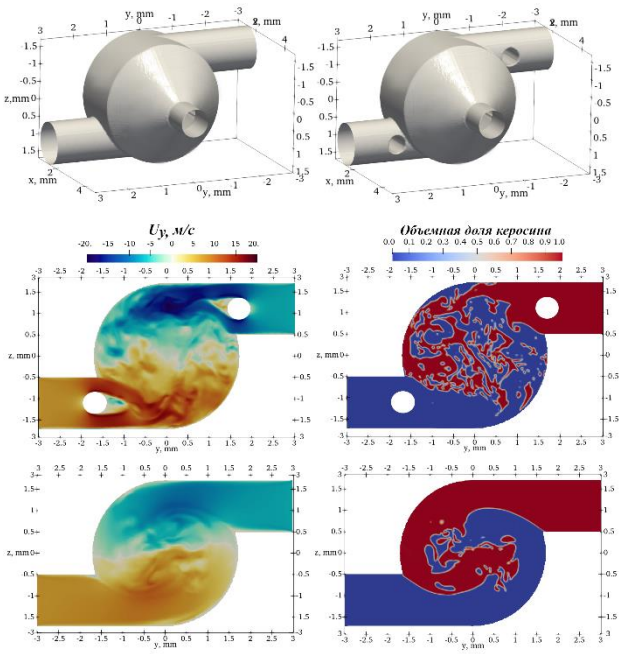


Рисунок 1. Вверху: геометрия исходной и модифицированной форсунок. Внизу: мгновенные поля скорости и объемной доли керосина внутри форсунки.

Исследование проведено за счет средств гранта РНФ №22-79-10246.

Список литературы:

1. Popinet S. An accurate adaptive solver for surface-tension-driven interfacial flows //Journal of Computational Physics. – 2009. – Т. 228. – №. 16. – С. 5838-5866.
2. Vozhakov I. S., Hrebtov M. Y., Yavorsky N. I., Mullyadzhanov R. I. Numerical Simulations of Swirling Water Jet Atomization: A Mesh Convergence Study //Water. – 2023. – Т. 15. – №. 14. – С. 2552.
3. Vreman A. W. An eddy-viscosity subgrid-scale model for turbulent shear flow: Algebraic theory and applications //Physics of fluids. – 2004. – Т. 16. – №. 10. – С. 3670-3681.

УДК 532.51

О НЕКОТОРЫХ РЕШЕНИЯХ УРАВНЕНИЯ ГИНЗБУРГА-ЛАНДАУ В ФАЗОВОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

Цвелодуб О.Ю.

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

Уравнение Гинбурга-Ландау является достаточно универсальной моделью, появляющейся в различных разделах естествознания. Оно описывает широкий спектр физических явлений в таких областях как фазовые переходы, оптические волноводы химические реакции (см., например, [1-4]). В одномерном случае это уравнение может быть представлено в виде:

$$W_t = W + (1+ic_1)W_{xx} - (1+ic_2)\,|W|^2 W. \qquad (1)$$

Здесь c_1 и c_2 - вещественные постоянные. В данной работе изучаются решения уравнения (1) справедливые в фазовом приближении. В этом приближении рассматриваются гармонические решения, испытывающие малые модуляции, которые представляются в виде:

$$W = A\exp(i\omega t - iQx) + v(x,t)\exp(i\varphi(x,t)) \qquad (2)$$

Здесь $A = \sqrt{1-Q^2}$, , $\omega = -c_2 + (c_2 - c_1)Q^2$.

В этом случае можно получить отдельное уравнение для функции $u = \varphi_x$ [1]. После специальной замены переменных уравнение (2) принимает вид:

$$u_t + uu_x + S_1(uu_{xx})_x + u_{xx} + S_2 u_{xxx} + u_{xxxx} = 0. \qquad (3)$$

Здесь параметры S_1 и S_2 могут иметь как положительные, так и отрицательные значения. В случае, когда $S_1 = S_2 = 0$, уравнение (3) переходит в широко известное уравнение Курамото-Сивашинского. Ограничиваясь двумя первыми гармониками, в данной работе построено аналитическое решение уравнения (3). Оно представляется в виде:

$$u = \Gamma_1 \exp i\alpha(x-ct) + \Gamma_2 \exp 2i\alpha(x-ct) + K.C. \qquad (4)$$

Здесь α - волновое число, c - скорость стационарно-бегущей волны, $K.C$ - комплексно сопряженное выражение.

Из (3), (4) получаем:

$$c = -\alpha^2 S_2 \frac{\beta_2 + 8\beta_1}{\beta_2 + 2\beta_1}, \quad \beta_1 = \alpha^4 - \alpha^2, \quad \beta_2 = 16\alpha^4 - 4\alpha^2,$$

$$|\Gamma_1|^2 = \frac{8\alpha^6 S_2^2 + 2\alpha^2 c^2 + 10\alpha^4 S_2 c - \beta_1\beta_2}{\alpha^2(1-5\alpha^2 S_1)(1-2\alpha^2 S_1)}, \qquad (5)$$

$$\Gamma_2 = \frac{i\alpha(1-2\alpha^2 S_1)\Gamma_1^2}{2i\alpha c + 8i\alpha^3 S_2 - \beta_2}.$$

Для сравнения, используя метод многих масштабов, в работе аналитически построено решение уравнения (3) в окрестности нейтрального волнового числа $\alpha_n = 1$. Это решение согласуется с (5) в случае, когда волновые числа лежат в малой окрестности нейтрального волнового числа (в области $\varepsilon \ll 1$). В этом случае $\alpha = 1+\varepsilon$ и с точностью до поправки порядка ε из (5) нетрудно получить:

$$|\Gamma_1|^2 = -\frac{(6S_2^2 + 24)\varepsilon}{(1-5S_1)(1-2S_1)} + O(\varepsilon^2) > 0 \qquad (6)$$

Из полученных результатов следует, что величина параметра S_2, в отличие от S_1, на характер ветвления стационарно-бегущих решений от тривиального решения u=0 никак не влияет. Этот характер полностью определяется величиной параметра S_1. И из (6), и из решения в ближайшей окрестности α_n следует, что при отрицательном значении знаменателя в (6) поправка к нейтральному волновому числу ε положительна. В этом случае решения (5) ответвляются наружу от области неустойчивости $(\alpha > 1)$, т.е., имеет место жесткий тип бифуркации. Это происходит при выполнении неравенства $0.2 < S_1 < 0.5$. При условиях $S_1 < 0.2$ или $S_1 > 0.5$ решение (5) ответвляется внутрь области неустойчивости $(\alpha < 1)$ – мягкий тип ветвления. Сравнение аналитических результатов с точными численными решениями позволяют определить, когда использованные аналитические подходы дают реалистичные результаты, а когда их использовать нельзя. Так, например, при любых значениях параметра S_1 для параметра $S_2 = 0$ и у аналитических и у численных стационарно-бегущих решений, ответвляющихся от α_n, скорость $c = 0$. Что же касается амплитуд гармоник, при определенных значениях параметров S_1 и S_2 результаты могут радикально различаться.

Выражаю благодарность Бочарову А.А. за полезные обсуждения и проведение некоторых расчетов.

Список литературы:

1. Sakaguchi H. Phase Turbulence and Mutual Entrainment in a Coupled Oscillator System// Prog. Theor. Phys. 1990. V. 83. P. 69-174.
2. Bocharov A.A. Multiple scale method for a wave packet propagating in a nonlinear planar optical waveguide with gain and loss// Journal of Optics 2021. V. 23. P. 105501.
3. Fabrizio M. Ginzburg–Landau equations and first and second order phase transitions// Intern. J. Eng. Sci. 2006. V 44. P. 529–539.
4. Marini A., Skryabin D.V. Ginzburg-Landau equation bound to the metal-dielectric interface and transverse nonlinear optics with amplified plasmonpolaritons// Phys. Rev. 2010. V. A 81. P. 033850.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН (№ 122041400020-6).

УДК 621.9

ПРЯМАЯ И ОБРАТНАЯ ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЕЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА

Черный С.Г.[1], Зезюлин И.В.[2], Тарраф Д.[2], Почуев А.П.[2], Бороненко И.С.[2]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Технический углерод – востребованный продукт в связи с тем, что около 70% производимого в мире в промышленных масштабах этого углеродного материала применяется при изготовлении автомобильных шин. Наиболее распространенным способом получения технического углерода является печной метод, в котором технический углерод получается в результате пиролиза жидкого углеводородного сырья, происходящего при сжигании природного газа в топочной части реактора. Физико-химические свойства сырья, мелкость его распыла, соотношение расходов газа-теплоносителя и сырья определяют температуру в реакторе и оказывают существенное влияние на продолжительность реакций и основные показатели качества продукта: дисперсность и структурность [1]. Установление зависимостей дисперсности и структурности производимого технического углерода от состава и температуры углеводородного сырья, мелкости его распыла, продолжительности реакций относится к прямой задаче моделирования процесса печного производства технического углерода. Обратная задача включает нахождение таких параметров сырья и форсунки, которые обеспечили бы распыление сырья со средним диаметром капель, дающим максимальные дисперсность и структурность углерода. Решение обратной задачи позволяет оптимизировать технико-экономические характеристики всего процесса производства технического углерода. В [2-4] на основе эйлеро-эйлерова подхода предложена и обоснована трехмерная математическая модель распыла и испарения сырья в потоке газа-теплоносителя, являющаяся первым этапом решения прямой задачи. В настоящей работе осуществляется следующий шаг в решении прямой задачи - предлагается модель образования технического углерода. Её основу составляют два обыкновенных дифференциальных уравнения с источниковыми членами, описывающими мгновенное образование плотностей двух углеродных величин: числа частиц N и массы M [5]. В большинстве работ, посвященных моделированию образования углерода, данная модель используется для продукта с термином «сажа», получаемым в неконтролируемых условиях, для которых не характерен фиксированный набор свойств. Процесс получения технического углерода полностью контролируется, так как продукт должен отвечать определённым стандартам. Поэтому, одна из целей проведенных исследований заключается в адаптации модели неконтролируемого образования сажи при сгорании углеводородного сырья к условиям контролируемых параметров смеси в реакторе и коэффициентов математической модели, в том числе таких, которые максимизируют качество получаемого углеродного продукта. В модель заложены механизмы зарождения и развития углерода. Это - нуклеация (образование частиц за счет конденсации углерода из продуктов испарения сырья), коагуляция (сцепление мелких частиц с образованием более крупных), поверхностный рост (присоединение отдельных атомов и радикалов к поверхности крупных частиц) и окисление (реакции с кислородом и OH-радикалами). Коэффициенты модели, установленные из вида каждого из источниковых членов и последующим их суммированием, зависят от параметров течения в реакторе смеси сырья, продуктов его испарения и газа-теплоносителя. Проведены расчеты изменения во времени образования указанных плотностей двух углеродных величин при характерных значениях параметров смеси сырья, продуктов его испарения и газа-теплоносителя в реакторе. Выявлены особенности зарождения и эволюции параметров качества технического углерода, зависящих от углеродных величин: дисперсности и структурности. Проведен анализ чувствительности массы и числа частиц технического углерода ко входным параметрам построенной модели. Поставлена и решена оптимизационным методом обратная задача определения характерных параметров течения смеси в реакторе, при которых будет достигаться максимальные значения дисперсности и структурности зарождаемого в этой смеси технического углерода.

Список литературы:

1. Образование углерода из углеводородов газовой фазы / Теснер П. А.; М.: Химия, 1972. 135 с.
2. Аксёнов А. А., Жлуктов С. В., Каширин В. С., Сазонова М. Л., Чёрный С. Г., Дроздова Е. А., Роде А. А. Численное моделирование в ПК FlowVision распыла и испарения сырья в потоке газа-теплоносителя при печном производстве техического углерода// КИМ. 2023. Т. 15. № 4. С. 921–939.
3. Aksenov A. A., Zhluktov S. V., Kashirin V. S., Sazonova M. L., Cherny S. G., Zeziulin I. V., Drozdova E. A., Rode A. A. Numerical modelling of raw materials atomization and vaporization in a heat carrier gas flow in technical carbon production based on the Euler approach. E3S WoC. 2023. V. 459. 04019.
4. Аксенов А.А., Жлуктов С.В., Каширин В.С., Сазонова М.Л., Черный С.Г., Зезюлин И.В., Калугина М.Д. Трехмерная численная модель испарения керосина в камерах сгорания газовых турбин// Перспективы суперкомпьютеров и инновации. 2024. Т. 10. № 4. С. 27–45.
5. Wen Z., Yun S., Thomson M.J., Lightstone M.F. Modeling soot formation in turbulent kerosene/air jet diffusion flames // Combustion and Flame. 2003. Т. 135. P. 323–340.

УДК 532.5

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОПРЯЖЕННОГО ТЕПЛООБМЕНА ПАДАЮЩЕЙ КАПЛИ С ТВЕРДОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Шаин А.М.[1], Вожаков И.С.[1]

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

Воздействие капель на нагретые поверхности привлекает большое внимания во многих промышленных приложениях, таких как распылительное охлаждение, закалка металлов, системах впрыска в двигателях внутреннего сгорания и т. д.

В процессе столкновения капель с нагретыми поверхностями эффективность теплопередачи и динамика удара сильно зависят от температуры поверхности.

Явлению передачи тепла от стенки к капле посвящено большое количество экспериментальных исследований, однако одним из критических ограничений экспериментальных исследований является то, что трудно визуализировать границы раздела жидкость-твердое тело и объемное пространство внутри капли, а также получить подробную информацию о распределении температуры внутри капли.

В настоящей работе было выполнено численное моделирование падения капли жидкости на плоскую нагретую поверхность. Моделирование проведено путем численного решения следующих уравнений:

$$\rho\left(\frac{\partial u_i}{\partial t}+u_j\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(2\mu D_{ij}\right)+F_i+\rho g_i \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t}+u_i\cdot\frac{\partial T}{\partial x_i}=\chi\cdot\frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i}=0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t}+u_i\frac{\partial f}{\partial x_i}=0 \quad (4)$$

Здесь (1) – уравнение Навье-Стокса, где $D_{ij}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)$ – тензор деформации, $F_i=\sigma k\delta_s n_i$ – сила поверхностного натяжения (σ – коэффициент поверхностного натяжения, $k=-\frac{\partial n_i}{\partial x_i}$ – кривизна поверхности, n_i – вектор нормали к поверхности, $\delta_s=\sqrt{\frac{\partial f}{\partial x_i}\frac{\partial f}{\partial x_i}}$ – δ-функция поверхности), (2) – уравнение теплопроводности, где T – температура, χ – коэффициент температуропроводности , (3) – уравнение неразрывности, (4) – уравнение переноса для объемной доли *f*, Для решения использовался код Basilisk [1]. Уравнение теплопроводности решалось с учетом приближения Буссинеска для плотности и температуры [2]. Отслеживание межфазной поверхности осуществлялось с помощью метода VOF [3].

Расчетная область представляла из себя кубический домен размером 10 мм, в которой задавались начальные условия: начальная скорость падения, высота падения, температура капли, окружающей среды и подложки, а также граничные условия: условия прилипания и непротекания на подложке, условие свободного вытекания на боковых гранях и условие постоянства давления на верхней грани.

Пространственная дискретизация расчетной области выполняется с использованием кубических ячеек. Сетка адаптивно сгущается с помощью специального алгоритма, который оценивает локальную ошибку аппроксимации градиентов расчетных величин.

Вязкость, плотность, коэффициент поверхностного натяжения и температуропроводность для воды соответственно равнялись μ = 1.8·10^{-5} Па·с, ρ = 997 кг/м^3, σ = 72.12 мН/м, χ = 1.4·10^{-7} м^2/с. Для воздуха значения были следующие μ = 1.47·10^{-3} Па·с, ρ = 1,2 кг/м^3, χ = 2·10^{-5} м^2/с.

На рис. 1 представлена визуализация распределения температуры внутри капли и в окружающем ее пространстве. В расчете капля воды с начальной температурой, равной 20ºС, окруженная воздухом такой же температуры, сбрасывалась на подложку, нагретой до 100ºС.

На рисунке отчетливо виден процесс переноса тепла в окружающее пространство. Также видно, что в центре капли присутствуют вихри повышенной температуры, которые могут возникать из-за наличия пузырьков воздуха, благодаря которым в этом месте возникает сложная структура течения с повышенным теплообменом.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-71-10081)

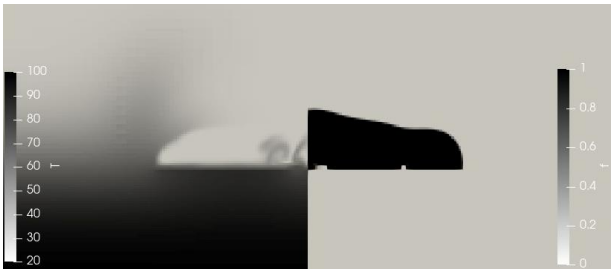


Рис. 1. Визуализация температуры (слева) и объемной доли (справа) при падении капли жидкости на плоскую нагретую поверхность

Список литературы:

1. López-Herrera J. M., Popinet S., Castrejón-Pita A. A. An adaptive solver for viscoelastic incompressible two-phase problems applied to the study of the splashing of weakly viscoelastic droplets //Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. 2019. Vol. 264. P. 144-158.
2. Свободная тепловая конвекция в условиях внутренней задачи / Остроумов Г. А: 1952. 256 с.
3. Hirt C. W., Nichols B. D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries // Journal of Computational Physics. 1981. Vol. 39, No. 1, P. 201-225.

1. .

УДК 536.26

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ГАЗО-ЖИДКОСТНЫХ ТЕЧЕНИЙ В МИНИКАНАЛЬНЫХ СМЕСИТЕЛЯХ

Швенг Н.А.[1,2], Роньшин Ф.В.[1,2]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Микро- и мини-канальные системы получили широкое распространение в микроэлектронике, аэрокосмической индустрии, транспорте и энергетике. Двухфазные течения в каналах малого сечения используются в медицинских устройствах, мембранных топливных элементах и испарительно-конденсационных системах термостабилизации космических аппаратов. Для повышения эффективности микросистем, необходимо применение новых методов, основанных на результатах фундаментальных исследований газо-жидкостного течения.

Для понимания механизмов теплообменных процессов необходимо иметь представление о структуре двухфазного течения в исследуемых каналах. Существует значительное количество работ по изучению двухфазного течения. В литературе представлена различная классификация каналов по их поперечным размерам. Обзор исследований режимов газожидкостного течения в мини- и микроканалах проводился в работах [1 – 3]. В публикациях [4, 5] был выполнен детальный обзор статей, посвященных в основном течению в круглых микротрубах. В большинстве известных работ рассматривались режимы течения и градиенты давления. Несмотря на значительно количество исследований, процесс формирования двухфазного течения до сих пор недостаточно изучен. Целью настоящей работы является исследование формирование режимов двухфазных течений в зависимости от геометрии миниканальных смесителей.

Экспериментальный стенд состоял из сменных миниканалов, смоделированных в CAD-программе и напечатанных с помощью DLP 3D-принтера ANYCUBIC® Photon Mono X. В данной работе были изучены течения в X-образном, T-образном и встречном миниканалах. Их геометрические характеристики и направления потоков изображены на рис. 1. Глубина всех миниканалов составила 0.5 мм. Для исследования режимов газожидкостного течения использовался теневой метод. Высокоскоростная камера Phantom® VEO 410, с помощью которой осуществлялась визуализация, размещалась над миниканалом, под ним размещался точечный источник света Olympus® KL 2500 LED, свет от которого проходил через коллиматорную линзу, чтобы обеспечить равномерное освещение исследуемой области. Газ подавался из баллона со сжатым азотом через регулятор расхода Bronkhorst® EL-FLOW F-211CV. Жидкость подавалась шприцевым насосом ColeParmer® EW-74905-54, который обеспечивал точный контроль расхода жидкости. Кроме того, экспериментальная установка оснащена системой заправки шприца, которая состоит из резервуара с рабочей жидкостью и клапанов для управления потоками жидкости при больших значениях обоих расходов.

Во встречном миниканале наблюдались: пузырьковый, снарядный, снарядно-кольцевой и параллельный режимы течения. Для последнего характерны малые расходы газа и жидкости. В T-образном миниканале наблюдались все режимы, характерные для встречного канала. Механизмы формирования одних и тех же режимов существенно отличались для различных конфигураций смесителей.

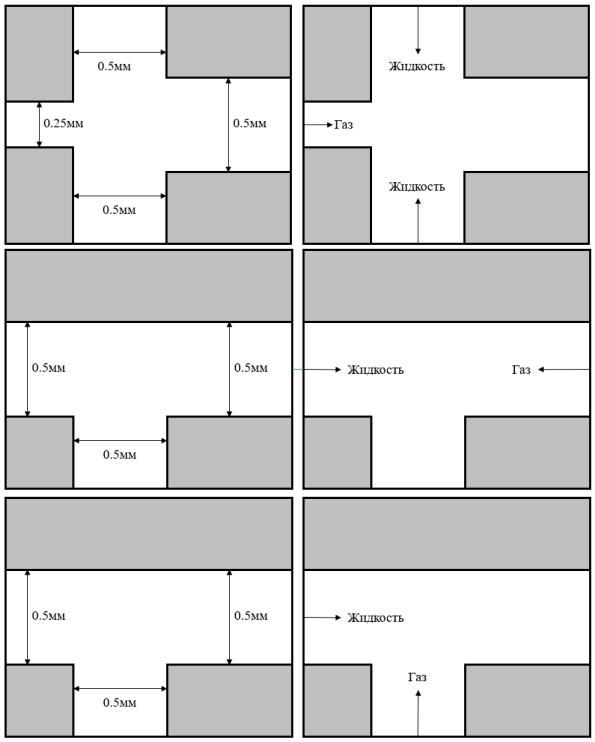


Рис. 1. Геометрические характеристики и направления потоков X-образного (а), T-образного (б) и встречного (г) миниканалов

Список литературы:

1. Чиннов Е.А., Кабов О.А. Двухфазные течения в трубах и капиллярных каналах // Теплофизика высоких температур, 2006. – Том 44 – № 5. – С. 777−795.
2. Saisorn S., Wongwises S. Flow pattern, void fraction and pressure drop of two-phase air–water flow in a horizontal circular micro-channel // Experimental Thermal and Fluid Sce., 2008. – Vol. 32 – № 3. – P. 748–760.
3. Чиннов Е.А., Роньшин Ф.В., Кабов О.А. Режимы двухфазного течения в микро-и мини-каналах (обзор) // Теплофизика и аэромеханика, 2015. – Т. 22 – № 3. – С. 275–297.
4. Ребров Е.В. Режимы двухфазного течения в микроканалах // Теорет. основы хим. Технологии, 2010. – Т. 44 – № 4. – С. 371–383.

УДК 532.584

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ С КРУПНЫМИ ЧАСТИЦАМИ

А.В. Шебелев [1], А.А. Гаврилов [1], А.В. Минаков [1]

[1] Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79

Исследование поведения неньютоновских течений с твердыми частицами имеет большой прикладной характер. Данные течения широко распространены в нефтегазовой индустрии и горнодобывающей промышленности. Особую значимость такие течения имеют в процессе бурения скважин. Буровой раствор является неньютоновской жидкостью и используется для транспорта и удаления частиц выбуренной породы на поверхность.

В работе представлены результаты моделирования двухфазного турбулентного течения неньютоновской жидкости с крупными тяжелыми частицами. Предложенная ранее статистическая континуальная модель турбулентного двухфазного течения для несущих ньютоновских жидкостей [1] обобщена на случай неньютоновских жидкостей с нелинейной вязкопластической реологией. Модель включает уравнения течения смеси в целом, уравнение для переноса концентрации частиц с учётом межфазного скольжения и уравнение на скорость межфазного скольжения. Статистическая модель турбулентности несущей жидкости учитывает модуляцию турбулентности твёрдыми частицами. Реология несущей жидкости описывается моделью Гершеля – Балкли. Напряжения континуума частиц замыкаются реологической моделью.

В работе исследуется влияние числа Рейнольдса и реологических параметров жидкости на характеристики течения. Диапазон рассматриваемых чисел Рейнольдса находится в пределах от 1700 до15000, и объемная концентрация частиц от 0,1 до 0,18. Расчёты выполняются в предположении установившегося и однородного по длине канала двухфазного течения. На основе сравнения с экспериментальными данными [2] и данными DNS-DEM моделирования [2] показано, что предложенная модель позволяет хорошо предсказывать распределение концентрации частиц, скорости частиц и несущей жидкости и перепада давления в канале.

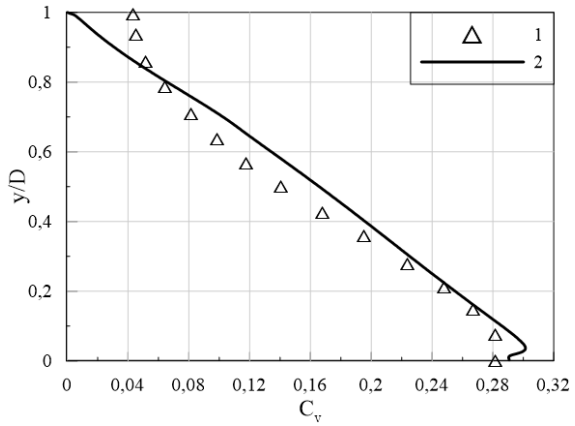


Рисунок 1 – Распределение концентрации частиц по высоте канала, где: 1 – эксперимент, 2 – расчет.

На рисунке 1 показан график распределения концентрации частиц по высоте трубы для числа Рейнольдса Re=15000 и объёмной доли частиц Cv = 0.16. Наблюдается хорошее совпадение профилей концентрации как по максимальной величине, так и по распределению по высоте канала.

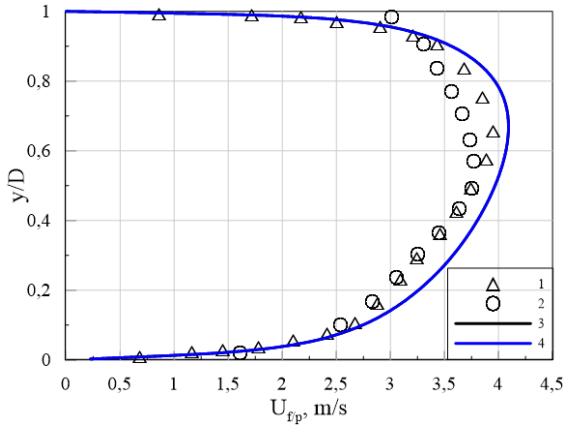


Рисунок 2 –Распределение продольной компоненты скорости жидкости и частиц по высоте канала(справа), где: 1 – скорость жидкости DNS – DEM расчет[2], 2 – скорость частиц DNS – DEM расчет[2], 3 – скорость жидкости расчет, 4 – скорость частиц расчет.

На рисунке 2 показан график распределение продольной компоненты скорости жидкости и частиц для числа Рейнольдса Re=15000 и объёмной доли частиц Cv = 0.16. Также наблюдается хорошее совпадение для профиля скорости жидкой фазы по максимальной скорости и его распределению. Однако в расчете DNS – DEM присутствует значительное проскальзывание фаз относительно друг друга в верхней части канала, где концентрация частиц меньше 0.1. В предположении полностью развитого течения, разработанная модель такого эффекта не дает, фазы движутся практически с одинаковой средней скоростью по всей высоте канала.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 23-79-30022 https://rscf.ru/project/23-79-30022.

Список литературы:

1. Гаврилов А.А., Шебелев А.В., Реологическая модель турбулентных течений суспензий в горизонтальных каналах // Теплофизика и аэромеханика, 2020. Т. 27, № 3 С. 403-421.
2. E. Zheng, M. Rudman, S. Kuang, A. Chryss, Turbulent coarse-particle non-Newtonian suspension flow in a pipe // International Journal of Multiphase Flow. 2021. 142 P.17.

УДК 536.423

ТРИГГЕР ПАРОВОГО ВЗРЫВА КАПЛИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО РАСПЛАВА В ВОДЕ. ОБСУЖДЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

Ивочкин Ю.П.[1], Синкевич О.А.[1,2], Щигель С.С[1], Юдин С.М.[1,2]

[1] Объединенный институт высоких температур РАН,
125412, Россия, Москва, Ижорская 13 стр.2
[2] НИУ Московский Энергетический Институт,
111250, Россия, Москва, Красноказарменная, 14, стр.1

Актуальность исследования парового взрыва (самопроизвольного взрывного вскипания в воде) при падении в неё сильно нагретой капли расплава связана с возможностью аварий в ряде технологических процессов – на атомных электростанциях, в металлургии и т.п. При имеющемся большом количестве экспериментальных данных [1-2] модели описания начальной стадии процесса носят в основном описательный (и во многом противоречивый) характер [3-4].

Первичный (без внешнего импульса) паровой взрыв может быть разбит на две стадии. Это, во-первых, возникновение импульса давления на внешней поверхности капли расплава и, во-вторых, распад капли на фрагменты с последующим образованием большого количества пара на резко возросшей поверхности теплообмена. Нами рассматривается расчетная модель первой стадии процесса. Согласно предлагаемой модели, триггером парового взрыва является импульс давления, возникающий при взрывном вскипании воды при контакте ее с поверхностью, расплавленной металлической капли в результате нарушения (в силу неустойчивости Релея-Тэйлора или Кельвина-Гельмгольца) целостности паровой пленки, окружающей сферическую каплю расплавленного металла (рис.1).

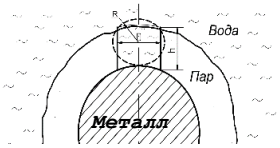


Рис.1 Схема вскипания воды при нарушении целостности паровой пленки;

Для оценки скорости прогрева цилиндрического столбика воды, контактирующего с поверхностью капли, решалась задача нестационарной теплопроводности в цилиндрических координатах с учетом нелинейности распределения температуры в окружающей цилиндр паровой пленке. При этом согласно проведенным расчетам, прогрев столбика воды по вертикали мало зависит от площади пятна контакта. Условием взрывного вскипания жидкости [5] является достаточно глубокий заход в метастабильную область, так что $T^* - Ts = \beta L / \bar{C}p$ Здесь: L – скрытая теплота парообразования; T^* – температура перегретой жидкости; Ts – температура насыщения; Cp – средняя теплоемкость при нагреве; для воды при атмосферном давлении β = 0,42. В [5] отмечается, что жидкость можно сильно перегреть при достаточно быстром нагреве. При этом необходимо обеспечить такое тепловыделение в жидкости, которое значительно превышало бы расход тепла на испарение в действующих центрах. Используя экспериментальное время ожидания вскипания, определяем объем жидкости, в котором за это время будет обеспечен режим взрывного вскипания и эквивалентный радиус шара, соответствующий этому объему (зависящий от площади контакта). Время выкипания объема столбика перегретой жидкости центрах по [5]:

$$\tau'' = \frac{1}{\varphi^{1/k}} \left(\frac{\rho'}{\rho''} \frac{3}{4\pi\bar{\Omega}}\right)^{1/3k},$$

здесь: Ω – число центров в единице объема; ρ', ρ'' – плотности соответственно жидкости и пара.

Далее, учитывая расширение вскипающего объема (со скоростью звука), рассчитывается возникающий в рассматриваемом объеме импульс давления в зависимости от температуры поверхности расплавленной капли и площади пятна контакта. Полученные зависимости представлены в виде соответствующих графиков. При этом, получен безразмерный критерий для определения плотности пара в пузырьке (и советующего давления) на момент выкипания всей жидкости в рассматриваемом объеме.

$$K = \frac{C}{R}\left(\frac{3}{\pi\bar{\Omega}}\right)^{\frac{1}{3}} \sqrt{\frac{3T}{2\Delta TL}}.$$

Время процесса определится как:

$$\tau'' \approx \frac{1}{\sqrt{\frac{2}{3}\frac{\Delta TL\rho''}{T(\rho' - \rho'')}}} \left(\frac{\rho'}{\rho''}\frac{3}{4\pi\bar{\Omega}}\right)^{\frac{1}{3}}$$

Здесь: T – температура в зоне контакта; ΔT – глубина захода в метастабильную область; L – скрытая теплота парообразования; C – скорость звука; R – радиус пятна контакта. Сравнение с экспериментальными проведено по работе [6].

Список литературы

1. В.И. Мелихов, О.И. Мелихов, С.Е. Якуш /Термическое взаимодействие высокотемпературных расплавов с жидкостями // ТВТ., 2022., Т. 60., №4., С.280-318.
2. Chen.Wang, Chan.Wang, B.Chen, M.Li, Z.Shen/ Fragmentation regimes during the thermal interraction between molten tin droplet and cooling water//International Journal of Heat and Mass Transfer., 166.,2023.,120782.
3. G. Ciccarelli, D.I.Frost/ Fragmentation mechanisms based on single drop steam explosion experiments using flash X-ray radiography//Nucl.Eng.Des.,1994.,V.146., pp.109-132
4. M.L.Corradini, B.J.Kim/ Modeling of small-scale single droplet fuel coolant interactions//Nucl.,1988.,V.98., pp. 16-28.
5. Скрипов В.П./ Метастабильная жидкость//«Наука»., Москва., 1972., 312с.
6. L. Manicam, G.Qiang, W.Ma, S. Bechta/An experimental study on the intense heat transfer and phase change during melt and water interactions//Experimental Heat Nransfer,Doi10.1080/08916152., 2018.,1505786.

УДК 536.423

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФРАГМЕНТАЦИИ РАСПЛАВОВ МЕТАЛЛОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ВОДОЙ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Бородина Т.И.[1], Ивочкин Ю.П.[1], Кубриков К.Г. [1], Синкевич О.А.[1,2], Тепляков И.О.[1], Юдин С.М.[1,2]

[1] Объединенный институт высоких температур РАН,
125412, Россия, Москва, Ижорская 13 стр.2
[2] НИУ Московский Энергетический Институт,
111250, Россия, Москва, Красноказарменная, 14, стр 1

При падении капель горячих металлов в воду, имеющую температуру ниже температуры насыщения, наблюдается фрагментация расплава на мелкие осколки, которая сопровождается импульсами давления [1]. Подобный процесс, называемый маломасштабным паровым взрывом, позволяет в деталях моделировать многие закономерности чрезвычайно опасных промышленных паровых взрывов, которые наблюдались в металлургии, атомной энергетике и бумажной отрасли [2]. Также маломасштабные паровые взрывы могут использоваться в некоторых технологических процессах, например, для получения аморфных материалов [3]. Исследования причин дробления горячих жидкометаллических капель при их взаимодействии с охладителем интенсивно проводятся с середины прошлого столетия. Однако, несмотря на многолетнюю историю изучения, механизм этого интересного физического явления изучен недостаточно полно, в частности, из-за ограниченности объема имеющейся достоверной экспериментальной информации.

В докладе представлены результаты экспериментальных исследований особенностей фрагментации легкоплавких металлов (Sn, Bi, Pb), включая данные о структуре образующихся осколков на предмет степени их аморфности.

В проведенных опытах применялись как индукционные нагревательные установки (характерные частоты наведенных токов 60 кГц и 250 кГц, максимальная температура нагрева $T_{макс.}$ ~1600 °C), так и резистивная плавильная печь с $T_{макс.}$ ~1100 °C. Эксперименты с использованием индукционных нагревателей выполнялись в следующей последовательности. Твердый металлический образец с известным весом размещался внутри витков индуктора и в состоянии левитации разогревался до температуры, превышающую температуру плавления металла. При отключении электропитания индуктора жидкометаллическая капля падала в прямоугольную стеклянную емкость размером 1000×600×600 мм, заполненную дистиллированной водой комнатной температуры. При использовании печи с резистивным нагревом расплавленный металл в форме струи выливался непосредственно из тигля в рабочую ванну.

В опытах использовались видеокамеры с максимальной скоростью видеосъемки 960 кадр/с. Нагрев образца и его остывание при падении до входа в воду осуществлялось либо в среде инертного газа (аргон), либо на воздухе. Температура образца оценивалась, по показаниям пирометра и хромель алюмелевой термопары. Для измерения импульсов давления применялись пьезоэлектрические датчики Kistler типа 601A. Измерения проводились в измерительной среде LabVIEW с использованием вторичной аппаратуры National Instruments. Исследование фазовых составов образцов после дробления выполнялось методом рентгеноструктурного анализа по стандартной методике на отечественной установке типа ДРОН-2.

В результате проведенных исследований было установлено, что при одинаковых начальных условиях (равенство высот падения, масс, начальных температур расплавов и охлаждающей воды) наблюдаются существенные отличия для применяемых металлов как в значениях импульсов давления, так структуре образующихся фрагментов. Наибольшие амплитуды импульсов давления, которые в ряде случаев приводили к разрушению рабочего сосуда (по этой причине большая часть экспериментов была проведена в ограниченных диапазонах изменения массы образцов и их температуры: 3 – 15 г и 300 – 900 °C, соответственно) наблюдались в опытах с жидким свинцом. В пересчете полученных опытных данных на возможное волновое давление, генерируемое вблизи места взрывной фрагментации расплава, оценочное значение амплитуды этой величины достигало ~100 МПа. Амплитуда максимальных импульсов давления при взрывной фрагментации олова и свинца в полтора, два раза ниже.

Отличительная особенность дробления оловянных капель состоит в образовании фрагментов с особой сотовой структурой, которая характеризуется увеличенной площадью соприкосновения охладителя с расплавом. Процесс дробления висмута существенно в большей степени, чем для олова, зависит от высоты падения капель, т.е. от скорости ее погружения в воду. Для процесса дробления висмута характерно образование осколков относительно крупных (сантиметр – несколько миллиметров) размеров.

Результаты опытов подтвердили, что при взрывной фрагментации горячих жидкометаллических капель, падающих в воду комнатной температуры, образуются материалы с аморфной структурой, причем степень аморфности дробленого материала увеличивается с ростом объема падающей капли.

Список литературы

1. Deng Y., Guo Q., Xiang Y., Fang D., Ma W. An Experimental study on steam explosion of multiple droplets in different chemical solutions // INT J HEAT MASS TRAN. 2024. V.226. P. 125477.
2. Мелихов В.И., Мелихов О.И., Якуш С.Е. Гидродинамика и теплофизика паровых взрывов М.: Изд-во "МПМех. РАН", 2020, 276 с.
3. Ивочкин Ю.П., Бородина Т.И., Казаков А.Н., Тепляков И.О. Экспериментально-расчетное исследование возможности получения аморфных сплавов при взрывной фрагментации горячих капель в низкокипящем охладителе // Тепловые процессы в технике. 2020. Т. 12. №3. С. 136–142.

Секция 2 Тепломассообмен при фазовых превращениях

УДК 536.24

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТНОЙ ПЛОТНОСТИ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА ПРИ КИПЕНИИ ПО ПОВЕРХНОСТИ ТРУБЧАТОГО НАГРЕВАТЕЛЯ

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

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

Процесс генерации пара один из важнейших этапов в энергетике. Поверхность испарителя в основном представляет собой пакет трубчатых нагревателей. Начиная от активной зоны и парогенераторов АЭС заканчивая обычными электрическими котлами. Ввиду различных форм, ориентации в пространстве и тепловой нагрузки необходима разработка индивидуального подхода для определения плотности теплового потока и коэффициента теплоотдачи при кипении на поверхности трубчатых нагревателей [1, 2]. Измерение местной плотности теплового потока (ПТП) в этих процессах позволит найти теплонапряженные области и повысить ресурс установок.

В работе представлен метод исследования – градиентная теплометрия, позволяющий оценить местную ПТП при кипении. Градиентная теплометрия основана на использовании градиентных датчиков теплового потока (ГДТП), действие которых основано на поперечном эффекте Зеебека [3].

Экспериментальный стенд включает нагревательный элемент номинальной мощностью 50 Вт при напряжении в 24 В, с диаметром 6 мм и длиной 20 мм. Для снижения концевых эффектов, с обоих концов нагревателя приварены латунные трубки того же диаметра (рис. 1.).

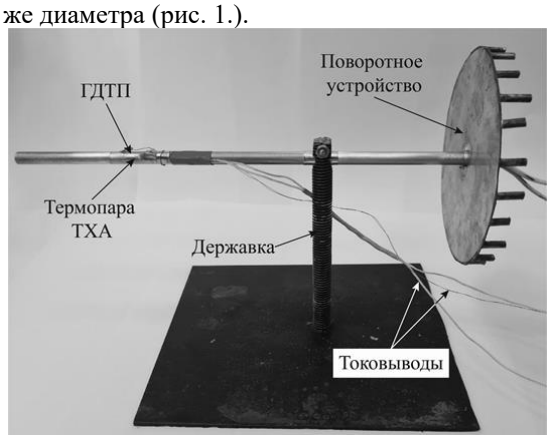


Рис. 1 – Фото экспериментального стенда

На поверхности нагревателя установлен ГДТП из висмута с размерами 6×0,75×0,35 мм. Рядом с ГДТП вварен спай термопары ТХА, для контроля температуры поверхности. Запись сигналов с ГДТП и термопары производилась на Измерительно-вычислительный комплекс *NIPIX -1050* с частотой записи 5 кГц.

Стенд целиком помещается в исследуемую жидкость, в данной работе рассмотрена вода при атмосферном давлении. Конструкция стенда позволяет размещать его в любом положении относительно горизонта.

В работе рассмотрено влияние наклона нагревателя на распределение местной плотности теплового потока по поверхности трубчатого нагревателя. На рис.2 представлено распределение местной ПТП по поверхности нагревателя.

φ – угол поворота относительно оси вращения нагревателя (φ = 0 ° - положение датчика на верхней образующей нагревателя).

β – угол наклона относительно горизонта (β = 0 ° горизонтальное положение установки).

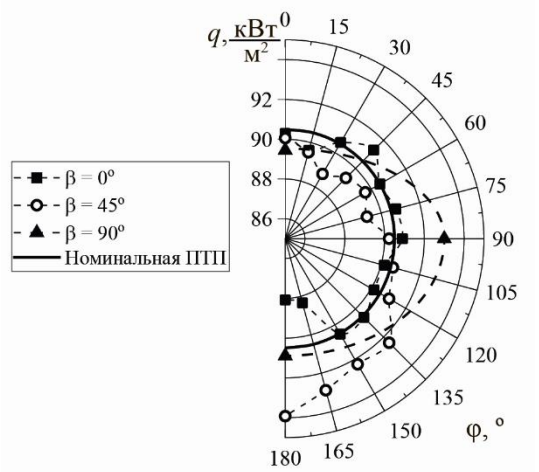


Рис. 2 – Угловая теплограмма для трех разных углов наклона наревателя

Из графика видно, что при вертикальной ориентации (β = 90 °) не наблюдается неравномерность, однако при уменьшении угла β возникает искажение профиль местной плотности теплового потока.

На угле β = 45 ° максимум плотности теплового потока зафиксирован на нижней образующей нагревателя (φ = 180 °). При горизонтальном расположении нагревателя (β = 0 °) максимум плотности теплового потока смещается на угол φ = 45 ° при локальном минимуме на нижней образующей нагревателя (φ = 180 °) из-за затрудненного отвода пара с поверхности теплообмена.

Значения местной ПТП, полученные с помощью градиентной теплометрии, демонстрируют информативность и эффективность данного метода. Обнаружена значительная неравномерность тепловыделений по углу поворота φ при изменении угла наклона нагревателя.

Список литературы:

1. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотип. М.: «Энергия», 1977. 344 с
2. *Carey, Van P. "Liquid-Vapor Phase-Change Phenomena: An Introduction to the Thermophysics of Vaporization and Condensation Processes in Heat Transfer Equipment, Third Edition." (2020).*
3. Sapozhnikov S. Z., Mityakov V. Yu. Heatmetry. The Science and Practice of Heat Flux Measurement. St.-Petersburg: Springer International Publishing, 2020, p 209.

УДК 621.9

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРЯМОГО СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПРОЦЕССЫ ПЛАВЛЕНИЯ ПАРАФИНА В ЗАМКНУТОЙ ДВУМЕРНОЙ ОБЛАСТИ

Бондарева Н.С.[1], Шеремет М.А.[1]

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

Большая часть потребляемых энергетических ресурсов используется для поддержания тепловых условий в зданиях и инфраструктурных объектах. Системы кондиционирования воздуха и отопительные юниты во многих случаях работают практически круглосуточно. Современные технологии и новые материалы позволяют повысить тепловую инерционность строительных объектов, обеспечить накопление, сохранение и преобразование солнечной энергии для дальнейшего использования. В связи с этим важным направлением в проектировании жилых и производственных объектов, а также систем, обеспечивающих внутренние климатические условия, является исследование процессов тепломассопереноса с учетом большого количества внутренних и внешних факторов. Использование фазовых переходов в элементах ограждающей конструкции, системах вентиляции и кондиционирования воздуха в определенных условиях позволяет накапливать большое количество энергии в пассивном режиме и сохранять в течение длительного времени. При использовании материалов с изменяемым фазовым состоянием в строительных элементах следует учитывать климатические условия эксплуатации, условия, поддерживаемые внутри объекта [1].

Данная работа посвящена численному исследованию процессов плавления и затвердевания материалов в замкнутой прямоугольной области, на вертикальных границах которой заданы условия конвективного теплообмена с окружающей средой, а также нестационарного солнечного излучения на одной из сторон (см. рис. 1). Температура внешней среды меняется с периодом равным 24 часа. В расплаве, считающимся вязкой, несжимаемой жидкостью, развивается ламинарная естественная конвекция.

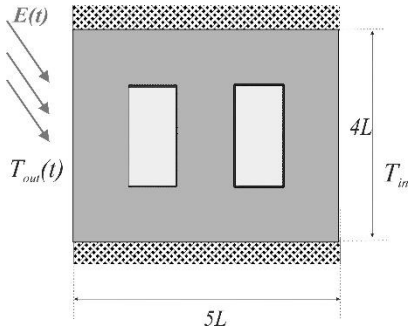


Рисунок 1. Область решаемой задачи.

Математическая постановка была сформулирована с использованием сглаживающей функции для формулировки перехода энтальпии и теплофизических свойств материала на границе раздела сред. На левой стенке, граничащей с окружающей средой были заданы граничные условия, учитывающие воздушную конвекцию и нестационарный поток прямого солнечного излучения. Главные уравнения в безразмерных переменных функция тока завихренность и температура решались с использованием метода конечных разностей.

На рисунке 2 представлены поля температуры и функции тока для разных максимальных значений потока прямой солнечной радиации E_{max}, в момент времени $t = 6$ часов. При слабом излучении, наблюдается сгущение изотерм на межфазной границе, там происходит интенсивное поглощение энергии, при этом правая часть блока остается непрогретой. Из представленных случаев наиболее быстро процесс плавления происходит при $E_{max} = 200$ Вт/м^2, когда объем твердого материала практически исчезает, тапло распространяется к правой стенке.

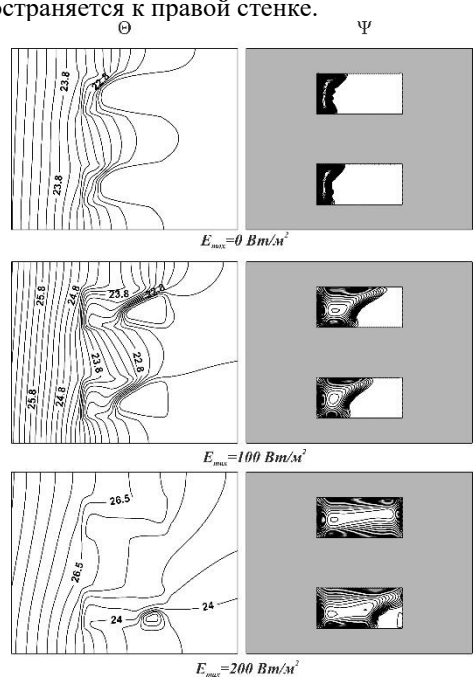


Рисунок 2. Поля температуры и линии тока для разных значений потока прямой солнечной радиации, в момент времени t = 6 часов

В результате численного моделирования было оценено влияние нестационарного солнечного излучения на процессы теплообмена в замкнутой сопряженной области, содержащей материал с изменяемым фазовым состоянием.

Работа выполнена в рамках реализации проекта Российского научного фонда (соглашение № 22-79-10341).

Список литературы:

1. Hamidi Y. Analysis of the thermal behavior of hollow bricks walls filled with PCM: Effect of PCM location / Y. Hamidi, M. Malha, A. Bah // Energy Reports. 2021. Vol. 7. P. 105–115.

УДК 536.24: 536.423.1: 533.563

ВЛИЯНИЕ ВЫСОТЫ СЛОЯ ЖИДКОСТИ НА ПУЛЬСАЦИИ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ИСПАРЕНИИ/КИПЕНИИ В УСЛОВИЯХ ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ

Брестер А.Е.[1, 2], Жуков В.И.[1, 2], Павленко А.Н.[1]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] Новосибирский государственный технический университет,
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

В данной работе представлены экспериментальные данные по влиянию высоты горизонтального слоя жидкости на пульсации давления при испарении/кипении в условиях пониженного давления.

Эксперименты проводились на экспериментальной теплообменной вакуумной установке, представляющей собой термосифон, подробное описание которой приведено в работе [1].

В качестве рабочей жидкости использовался н-додекан. Давление в рабочей камере варьировалось в широком диапазоне значений от 33 Па до $2 \cdot 10^4$ Па. Опыты проводились при высотах слоя жидкости h от 1,4 мм до 40,0 мм.

Целью данной работы являлось определение влияние высоты слоя жидкости на амплитуду пульсаций давления, а также анализ зависимости спектров мощности пульсаций давления от частоты $S(f) = 1/f^{\alpha}$, полученных методом быстрого преобразования Фурье.

На рисунке 1 приведена зависимость пульсаций давления от времени при постоянном тепловом потоке $q = 3{,}5 \cdot 10^4$ Вт/м^2 для различных высот слоя жидкости, полученных при давлении в рабочей камере 67 Па. Из рисунка 1 видно, что при увеличении высоты слоя жидкости от 4 мм до 20 мм амплитуда пульсаций увеличивается примерно в 10 раз. При высоте слоя жидкости 4 мм амплитуда пульсаций 12 Па, а при высоте слоя жидкости 20 мм – 110 Па. При высоте слоя жидкости более 10 мм наблюдается периодическое взрывное кипение [2]. Через большие промежутки времени, например ~ 30–40 с (Рис. 1(б)) происходит разрушение слоя жидкости и выделение большого количества пара, что приводит к значительным пульсациям давления. В промежутке между взрывами накапливается большое количество энергии, которая высвобождается при взрывном переходе жидкости в пар.

Как было показано в [3], спектры пульсаций давления, полученных с помощью Фурье-анализа, позволяют установить взаимосвязь между поведением спектральной функции пульсаций давления в различных режимах теплообмена, а также степенью приближения к критическому тепловому потоку при развитии кризисных явлений.

Анализ спектров пульсаций давления для режимов взрывного кипения позволяет определить характерную частоту, соответствующую периодичности взрывного кипения. Также данный подход позволяет количественно сравнить мощность пульсаций давления, полученных в различных теплообменных системах и аппаратах.

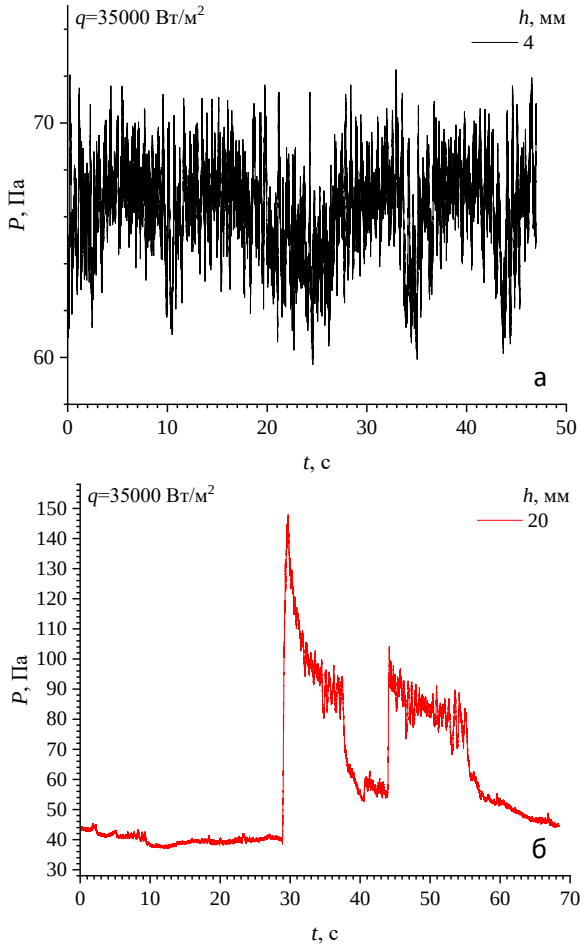


Рисунок 1 – Зависимость давления от времени при 67 Па

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН (№ 121031800216-1).

Список литературы:

1. Zhukov V.I. and Pavlenko A.N. Heat transfer and critical phenomena during evaporation and boiling in a thin horizontal liquid layer at low pressures // Int. J. of Heat and Mass Transfer. 2018. V. 117. P. 978-990.
2. Brester A.E., Shvetsov D.A., Zhukov V.I., Pavlenko A.N. Heat Transfer during Evaporation/Boiling of Horizontal Layers of Liquid at Low Pressure // J. Eng. Thermophys. 2023. V. 32, № 3. P. 415–454.
3. Brester A.E., Zhukov V.I., Shvetsov D.A., Pavlenko A.N. Power spectra of pressure pulsations in the processes of evaporation/boiling of a liquid at low pressures // Journal of Physics: Conference Series. 2021. V. 2039. Is. 1. P. 012006.

УДК 536.24

ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ НА БИФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ С МАССИВАМИ КАНАВОК

Владимиров В.Ю.[1], Хмель С.Я.[1], Чиннов Е.А.[1]

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

Интенсификация теплообмена – важная задача во многих прикладных областях, где требуется отведение больших тепловых потоков. Для таких целей часто используется теплообмен при кипении. Одним из перспективных способов интенсификации теплообмена при кипении является использование поверхностей с неоднородной смачиваемостью или бифильных поверхностей [1, 2]. В этом случае на гидрофильной поверхности формируются, как правило, локальные гидрофобные области, играющие роль эффективные центров парообразования, при этом хорошая смачиваемость на окружающей поверхности препятствует раннему развитию кризиса теплообмена, свойственному для однородных гидрофобных поверхностей.

В данной работе проводится исследование интенсивности теплообмена на модифицированных бифильных поверхностях с параллельными гидрофобными канавками, а так же с «сетками» пересекающихся под прямым углом канавок.

Модифицированные поверхности создавались на головке (диаметром 5 мм) медного сердечника. В сердечнике возле рабочей поверхности располагаются две термопары на разной глубине для контроля температуры стенки и определения теплового потока. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная, деионизированная, дегазированная вода (Milli-Q). Давление атмосферное.

Текстурирование медных поверхностей осуществлялось методом лазерной абляции [3]. После этого для придания бифилных свойств осуществлялась гидрофобизация поверхности с помощью хемосорбции фторированного метоксисилана из паров при температуре 100-110 °C [4]. Ожидается, что гидрофобизованый слой на гладкой поверхности меди при кипении будет достаточно быстро разрушен, а в областях, обработанных лазером, сохранится достаточно долго из-за разных типов адгезии.

Всего было создано три поверхности с параллельными канавками и три поверхности с сетками канавок. Две поверхности с параллельными канавками имели одинаковый шаг между канавками 1 мм. Различие заключалось в ширине канавок 30 мкм и 45 мкм соответственно. Третья поверхность обладала шагом 1,5 мм и шириной канавок порядка 80 мкм. Поверхности с сетками канавок различались шагом 0,5 мм, 0,7 мм и 1 мм соответственно. Ширина канавок составляла порядка 30 мкм для всех трех поверхностей. Для определения примерной глубины канавок осуществлялся кроссшекшн одного из образцов. Глубина канавок составила порядка 140 мкм. На рис. 1 представлены изображения обоих типов лазерного текстурирования.

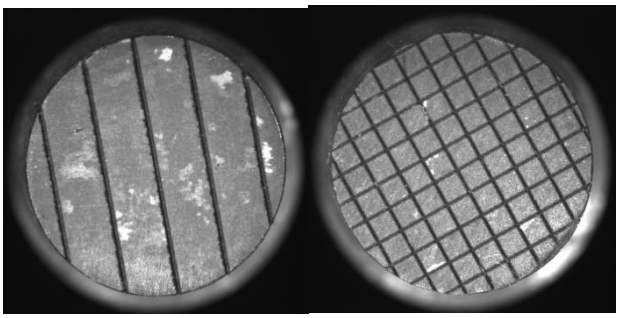


Рис. 1. Изображения поверхностей с параллельными канавками и с сеткой канавок.

Эксперименты показали, что на каждой из бифильных поверхностей происходит интенсификация теплообмена при кипении по сравнению с гладкой однородной поверхностью. Анализ экспериментальных данных для поверхностей с параллельными канавками позволяет заключить, что интенсивность теплообмена обратно зависит от шага между канавками, но при этом не зависит от ширины канавок. Эти закономерности согласуются с ранее полученными результатами для поверхностей с массивами гидрофобных каверн, изготовленных по такой же технологии. Однако ситуация с сетками канавок отличается. Не смотря на значительно различающийся шаг (от 0,5 мм до 1 мм), интенсивность теплообмена при кипении на этих поверхностях совпадает в пределах экспериментальной погрешности практически во всем диапазоне. Только при тепловых потоках выше 100 Вт/см^2 уменьшение шага приводит к интенсификации теплообмена, как и для параллельных канавок. Сравнение двух видов текстуры показывает, что интенсивность теплообмена на поверхностях с сетками канавок значительно выше (до 2х раз), чем на поверхностях с параллельными канавками.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания № 121031800213-0.

Список литературы:

1. Motezakker A. R. et al. Optimum ratio of hydrophobic to hydrophilic areas of biphilic surfaces in thermal fluid systems involving boiling // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. Т. 135. С. 164-174.
2. Može M. et al. Pattern geometry optimization on superbiphilic aluminum surfaces for enhanced pool boiling heat transfer // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. Т. 161. С. 120265.
3. Boinovich L. B. et al. Pulsed laser induced triple layer copper oxide structure for durable polyfunctionality of superhydrophobic coatings // Advanced Materials Interfaces. – 2018. – Т. 5. – №. 21. – С. 1801099.
4. Boinovich L. B., Emelyanenko A. M. The behaviour of fluoro-and hydrocarbon surfactants used for fabrication of superhydrophobic coatings at solid/water interface // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2015. – Т. 481. – С. 167-175.

УДК 536.2

ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ ВОДЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ЧЕРНОГО КРЕМНИЯ

Володин О.А.[1], Сердюков В.С.[1], Вячеславова Е.А.[2]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] Академический Университет им Ж.И. Алферова,
194021, Россия, Санкт-Петербург, ул. Хлопина 8, к.3

Исследования по повышению критического теплового потока (КТП) проводятся вот уже почти столетие. Одним из наиболее эффективных способов увеличения КТП является модификация поверхности кипения, ведущая к улучшению смачиваемости, повышению плотность центров парообразования, и увеличению площади тепловыделяющей поверхности. Целью данной работы было создание супергидрофильных капиллярных поверхностей черного кремния различной морфологии для интенсификации теплообмена и повышения КТП при кипении жидкостей (вода, 3M Novec 7100) в условиях свободной конвекции.

Модификация теплообменных поверхностей из кремния осуществлялась с помощью метода криогенного плазмохимического травления в газовой среде SF_6/O_2 на установке “Oxford Plasmalab System 100 (ICP 380)” [1]. В результате были получены рабочие участки 20x20 мм с микро-наномодифицированной игольчатой структурой поверхности (т.н. черный кремний).

На первом этапе работы исследовалось влияние морфологии поверхности черного кремния на капиллярное всасывание воды и HFE-7100. Было подготовлено пять образцов капиллярных поверхностей, отличающихся характеристиками микроструктур, включая две гибридные поверхности, комбинирующие микроструктурирование разной высоты. В результате измерений было показано, что разработанные гибридные поверхности (см. значения столбцов гистограммы S_hyb-1, S_hyb-2 на рис. 1) демонстрируют заметно более высокие значения числа Wi (безразмерный параметр, характеризующий эффективность впитывания жидкости капиллярами поверхности), чем поверхности с микроструктурами одной высоты (S-1, S-2, S-3).

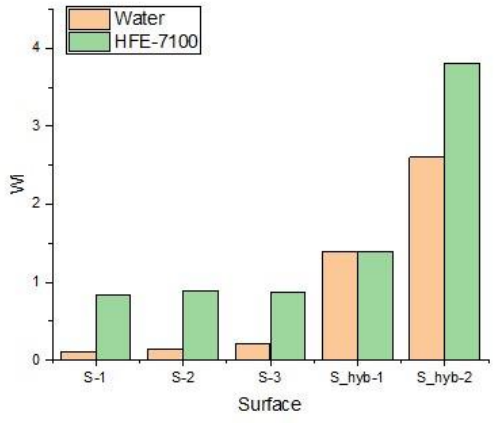


Рис. 1. Значения числа Wi для поверхностей черного кремния при кипении воды и HFE-7100.

Одна из возможных причин наблюдаемого роста числа Wi для гибридных поверхностей – дополнительное растекание жидкости вбок по поверхности благодаря более высоким микроструктурам, в результате жидкость проникает в базовый капиллярный слой менее высоких микроструктур также и сверху, а не только сбоку, как в случае однородных микроструктур.

В настоящее время проводятся эксперименты по исследованию теплообмена при кипении воды на наиболее эффективных по характеристикам капиллярного смачивания однородной и гибридной поверхностях черного кремния (S-3, S_hyb-2). Результаты по интенсификации процесса кипения и увеличению КТП по сравнению с имеющимися результатами для эталонной гладкой поверхности (см. рис. 2) будут представлены в докладе. Предварительная оценка величины КТП, проведенная в [2] с использованием модели Рахмана и др. (2014) [3] для наиболее эффективной из исследованных гибридных поверхностей черного кремния при кипении воды продемонстрировала высокий потенциал данных поверхностей, с ожидаемыми значениями КТП порядка 4 МВт/м^2.

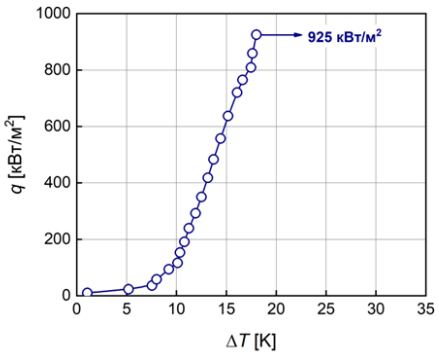


Рис. 2. Кривая кипения воды для эталонной гладкой поверхности из кремния.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (№ 23-29-10092) и Правительства Новосибирской области (соглашение № р-48).

Список литературы:

1. Vyacheslavova E. A. et al. Study of Cryogenic Unmasked Etching of “Black Silicon” with Ar Gas Additives// ACS omega. 2022. Т. 7. №. 7. С. 6053-6057.
2. Сердюков В.С., Вячеславова Е.А., Баранов А.И., Владыко И.В., Володин О.А. Влияние структуры черного кремния на капиллярное растекание жидкости// Теплофизика и аэромеханика. 2024. Т. 31. *Принята к печати*
3. Rahman M. M., Olceroglu E., McCarthy M. Role of wickability on the critical heat flux of structured superhydrophilic surfaces// Langmuir. 2014. Т. 30. №. 37. С. 11225-11234.

УДК 536.248.2

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ОБРАТНОГО ГРАДИЕНТА ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ФАЗОВОМ ПЕРЕХОДЕ

Гатапова Е.Я.[1]

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

Одной из до конца нерешенных фундаментальных задач в области фазового перехода является экспериментальное подтверждение возникновения обратного градиента температуры вблизи границы раздела жидкость-пар. Этот «парадокс» обсуждался в ряде теоретических работ [1,2]. Однако, до сих пор нет экспериментального подтверждения и описания. В данной работе измерены профили температуры вблизи границы раздела вода-водяной пар при пониженном давлении при с целью изучения обратного градиента температуры. Данные получены на микроуровне, а именно, температура определена с разрешением 3 мкм и точностью 0.01К [3]. Такие данные в литературе практически отсутствуют.

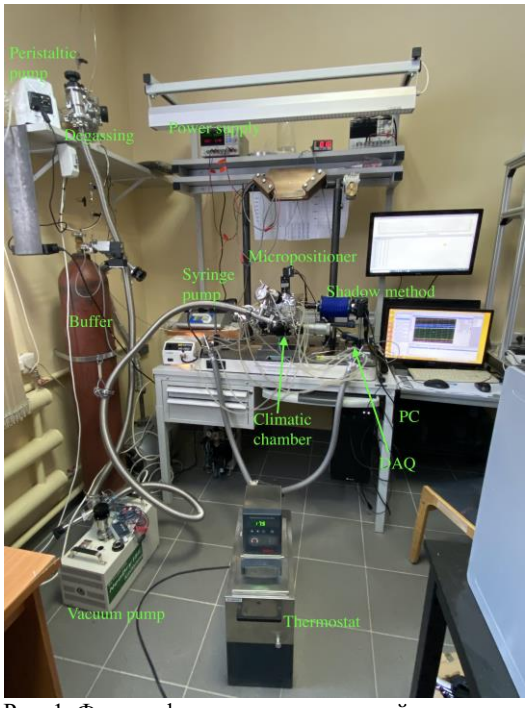


Рис. 1. Фотография экспериментальной установки.

Измерения проводились в климатической камере при пониженном давлении для системы вода-водяной пар (Рис. 1). Была изготовлена термостатируемая вакуумная камера из нержавеющей стали. Осесимметричный рабочий участок был сделан аналогично предыдущей нашей кювете из фторопласта. Диаметр кюветы 35 мм, глубина 1 мм. Диаметр нагревателя 1.5 мм, нагреватель расположен посередине на нижней стенке. Специально изготовленная микротермопара К-типа с поперечным размером королька 3 мкм и другие стандартные термопары были заведены внутрь климатической камеры. Были проведены эксперименты для системы вода-водяной пар для температур паровой фазы 3, 6, 10, 22, 30 ºС.

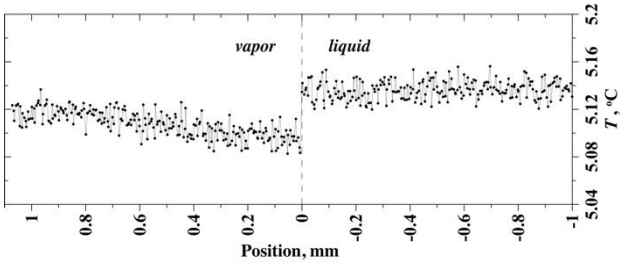


Рис. 2. Измеренный обратный градиент температуры, измеренный T_v = 5°C, p_v = 872,575 Па.

На Рис. 2 показан измеренный «обратный градиент температуры» вблизи границы раздела. Из-за существования скачка температуры температура пара на границе раздела в паре ниже температуры пара на отдалении от границы раздела. Градиент температуры вблизи границы раздела жидкость-пар отрицательный, затем на расстоянии около 0,7 мм от границы раздела жидкость-пар градиент температуры перестает быть отрицательным и колеблется около 0, хотя все еще ниже температуры жидкости на границе раздела T_L. Этот парадокс возникает из-за существования скачка температуры, профиль температуры в паре меняется «от холодного к теплому». Однако в случае испарения температура на поверхности жидкости часто выше, чем в любой точке паровой фазы.

Также в работе приводится аналитический подход к теоретическому описанию величины скачка температуры для многоатомного газа с несколькими степенями свободы.

Список литературы:

1. Aoki K., Cercignani C. Evaporation and condensation on two parallel plates at finite Reynolds numbers //The Physics of Fluids. – 1983. – Т. 26. – №. 5. – С. 1163-1164.
2. Gatapova E. Y. et al. The temperature and pressure jumps at the vapor–liquid interface: Application to a two-phase cooling system //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2015. – Т. 83. – С. 235-243.
3. Gatapova E.Y. Equilibrium and non-equilibrium state measurements at the liquid-vapor phase change interface (under review)

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-19-00722, https://rscf.ru/project/20-19-00722/

УДК 621.9

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛЕНОЧНОГО КИПЕНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СТРУИ НЕДОГРЕТОЙ ЖИДКОСТИ

Губанова Т.А.[1], Ягов В.В.[1]

[1] Национальный исследовательский университет "МЭИ",
Москва, 111250, ул. Красноказарменная, д. 14

Конструкционные материалы подвергают закалке в целях повышения прочности, получения мартенситной структуры. На скорость охлаждения при закалке оказывают влияние род жидкостей, теплопроводность тел и т.д. Длительное время специалистами в данной области отмечается, что в значительной степени охлаждение ускоряется при разбрызгивании воды через спрейерные или душирующие устройства.

На данный момент имеется множество исследований, направленных на понимание механизма процесса струйного охлаждения. Существует некоторое количество эмпирических моделей, основанных на полученных экспериментальных результатах. Но четкого понимания того, какие параметры и свойства оказывают непосредственное влияние на процесс, на данный момент нет. При этом конфигурация охлаждения нагретого тела затопленной струей жидкости рассматривается исследователями крайне редко. Однако авторы статьи [1] показывают, что затопленно-струйная система охлаждения по сравнению со стандартной закалкой в объеме жидкости при равных исходных гидравлических параметрах обладает более высокой охлаждающей способностью.

Для лучшего понимания механизмов процесса струйной закалки необходимо рассматривать пленочное кипение жидкости на охлаждаемой поверхности. Авторами монографии по технологии закалки [2] было предположено, что причина случайной неустойчивости пленки при кипении может заключаться в перемешивании жидкости, что в свою очередь является причиной возникновения интенсивного режима теплообмена при кипении. Эксперименты показали, что даже небольшое перемешивание может оказать существенное влияние на процесс. Но, опять же, в условиях недогрева жидкости до температуры насыщения. Эксперименты были проведены с помощью устройства, позволяющего вводить струю жидкости на охлаждаемую поверхность при той же температуре, что и в резервуаре. Контролируемое по мощности возмущение проявляет эффект вблизи границы раздела пар – жидкость, который и вызывает нестабильность паровой пленки при кипении.

Представленные в [2] результаты натолкнули авторов данной работы на проведение более детального исследования параметров, оказывающих непосредственное влияние на дестабилизацию устойчивого пленочного режима кипения при воздействии затопленной струи. Для проведения экспериментов был создан экспериментальный стенд (см. рис. 1), представляющий собой сосуд с охлаждающей жидкостью, в который погружается металлический образец сферической геометрии. Струя жидкости с температурой той же, что и в резервуаре подается на охлаждаемую поверхность с постоянной скоростью. Результатом эксперимента является термограмма охлаждения.

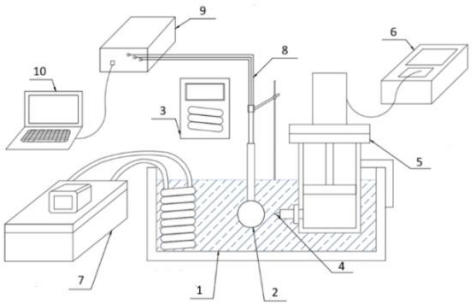


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – сосуд с охлаждающей жидкостью, 2 – образец, 3 – индуктор, 4 – сопло, 5 – устройство для впрыска жидкости, 6 – контроллер, 7 – термостат, 8 – термопары, 9 – измерительный модуль, 10 – ПК.

Получен важный результат, который, по существу, подтверждает общую схему модели, разработанную в 2018 году научной группой на кафедре ИТФ МЭИ [3]. Если процесс пленочного кипения в недогретой жидкости идет без искусственных воздействий, то там с хорошей вероятностью возникает несколько очагов, где устанавливается режим интенсивного теплоотвода и за счет того, что таких точек достаточно много, они могут сливаться и по итогу весь объект охлаждается стремительно. А если есть только один возбудитель (струя), то при снятии его тот тепловой поток, который за счет теплопроводности восстанавливает температуру поверхности до исходной, оказывается превалирующим, и охлаждение возвращается к медленному и спокойному, которое было до воздействия струи.

Получены новые экспериментальные данные охлаждения металлических шаров в различных жидкостях при воздействии затопленной струи. Подтверждено влияние на интенсивность процесса кипения расстояния сопло-поверхность. Но решающими параметрами, как и следовало ожидать, остается совокупность теплофизических свойств охлаждающей жидкости и коэффициента тепловой активности металла.

Список литературы:

1. Марукович Е. И., Маточкин В. А., Стеценко В. Ю. Перспективы применения затопленно-струйных систем охлаждения кристаллизатора и слитка при разливке стали на МНЛЗ., 2008.
2. F. Moreaux, G. Beck, P. Archambault. Effect of workpiece surface properties on cooling behavior. Quenching Theory and Technology, Second Edition by B. Liscic, H.M. Tensi, L.C.F. Canale, and G.E. Totten, Published in 2010 by CRC Press Book.
3. Yagov V. V., Zabirov A. R., Kanin P. K. Heat transfer at cooling high-temperature bodies in subcooled liquids //International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018., Т. 126., С. 823-830.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-79-10363).

УДК 536.24

ОСОБЕННОСИ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ТЕЧЕНИЙ В АДИАБАТНЫХ УСЛОВИЯХ И ТЕПЛОМАССОБМЕНА В УСЛОВИЯХ ЛОКАЛЬНОГО НАГРЕВА В ПЛОСКИХ МИКРОКАНАЛАХ

Дементьев Ю.А.[1,2], Дегтярев С.А. [1,2], Чащина М.С. [1,2], Роньшин Ф.В. [1,2], Чиннов Е.А. [1,2]

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

[2] Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Процессы теплообмена с фазовым переходом (кипение, испарение), происходящие при течении двухфазных или однофазных сред на микромасштабе изучены крайне слабо по сравнению с макромасштабными процессами. С уменьшением высоты канала, появляются новые виды неустойчивостей и особенности, не характерные для макро- и мини- масштабных течений. Так, например, при течении двухфазной среды на масштабе 50 мкм сильно развита неустойчивость Саффмана-Тейлора, что существенно увеличивает область контактной линии и ведет к интенсификации теплообмена при испарении. Реализуемые эффекты сжимаемости газа на масштабе примерно 500 мкм и ниже, и скольжения жидкости и газа на масштабе 10 мкм могут уменьшать гидравлическое сопротивление, по сравнению с классическими теоретическими предсказаниями. Кроме того, на данном масштабе характерные толщины пленок становятся от десятков нанометров до 1-2 мкм. Данные и другие особенности двухфазных течений в микроканалах могут быть крайне полезными в создании высокоэффективных теплообменных систем нового поколения, однако слабая изученность процессов, происходящих на данных масштабах препятствует этому. Для полного понимания процессов, происходящих в двухфазных потоках необходимо их изучение как в условиях локального нагрева, так и в адиабатных условиях

Данная работа посвящена изучению двухфазного газожидкостного течения в условиях локального нагрева в микроканале высотой 51,2 мкм и шириной 10 мм[2]. Проведена высокоскоростная визуализация потоков с помощью шлирен метода (сверху) и с использованием монохромного светодиода в качестве источника освещения (снизу). Использование двух оптических методик позволило зарегестрировать локальные характреистики потока, такие как пленки жидкости и их характерные толщины, волны, плоские капли и др.

Исследовано гидравлическое сопротивление в канале высотой 51,2 мкм. Измерен как однофазный, так и двухфазный перепад давления в канале 51,2 мкм с использованием HFE-7100 и воды в качестве рабочих жидкостей. Для однофазного потока жидкости экспериментальное данные согласуются с теорией Шаха и Лондона [1] для полностью развитого ламинарного течения. Для однофазного потока газа данные существенно отклоняются от данной зависимости, что вызвано сжимаемостью газа (зависимость плотности от давления). Показано, что однофазный перепад давления по газу описывается неявной формулой Чокетта [2] для идеального газа, где в качестве усредненного f_DRe используется выражение для несжимаемого потока. Это связано с тем, что сжимаемость влияет на f_DRe локально на входе при $L>>D_h$ при малых числах Маха. Предложена модификация модели раздельного течения Локхарта-Мартинелли, где в качестве однофазного перепада давления по газу используется неявное выражение Чоккета. Экспериментально определен параметр межфазного взаимодействия Чизхолма C[4]. На примере потоков вода-азот и HFE-7100-азот показано, что учет сжимаемости фаз дает физически корректную интерпретацию параметра C, включая только межфазное взаимодействие на трение, что согласуется с наблюдаемой картиной визуализации потоков (рис.1). Предложенная модификация модели позволит корректно определять параметр C при разработке корреляции для определения двухфазного перепада давления.

Также исследованы коэффициенты теплоотдачи при локальном теплообмене в канале. Показана эволюция коэффициентов теплоотдачи при увеличении массового парогазосодержания. Стагнация коэффициента теплоотдачи с увеличением массовой скорости газа объясняется влиянием массобмена при испарении и учетом сжимаемости парогазовой смеси – перепад давления (движущая сила потока) перестает расти с увеличением массового расхода газа за счет преобладания массового расхода пара над газом и учета сжимаемости пара/газа согласно уравнению Чоккета.

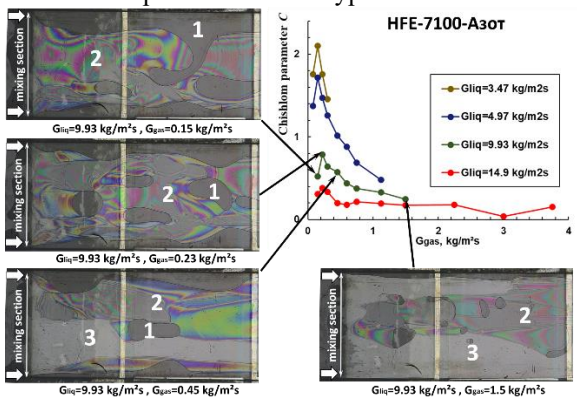


Рис. 1. Эволюция параметра Чизхолма от массовой скорости газа. 1-жидкость, 2-пленка жидкости сверху, 3-осушенная область

Список литературы:

1.. Shah R. K. A correlation for laminar hydrodynamic entry length solutions for circular and noncircular ducts. – 1978.

2. Choquette S. F. et al. Compressible fluid flow in micron sized channels. – American Society of Mechanical Engineering, New York, NY (United States), 1996. – №. CONF-960815-.

3. Chisholm D. A theoretical basis for the Lockhart-Martinelli correlation for two-phase flow //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1967. – Т. 10. – №. 12. – С. 1767-1778.

УДК 621.17

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССООБМЕНА В ПОДОГРЕВАТЕЛЯХ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ АЭС И ТЭС

Есин С.Б.[1], Миронова М.В.[1], Сухоруков Ю.Г.[1], Минаков А.В.[2], Платонов Д.В.[2]

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

[2] Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ),
660041, Россия, Красноярский край, г. Красноярск, пр. Свободный, 79

В настоящее время теплогидравлические расчеты подогревателей системы регенерации для турбоустановок ТЭС и АЭС выполняются с учетом рекомендаций, приведенных в нормативных документах [1, 2]. Учет факторов, определяющих интенсивность теплообмена в подогревателях при конденсации представляет собой чрезвычайно сложную задачу.

Целью настоящей работы являлось создание автоматизированной методики теплогидравлического расчета подогревателя с учетом сложной конфигурации трубного пучка и наличия неконденсирующихся газов.

Подогреватели низкого давления (см. рис. 1) применяются в схемах регенерации турбоустановок АЭС и ТЭС и предназначены для подогрева основного конденсата паром из отборов турбины. Основной конденсат подается в водяную камеру (1), далее внутри теплообменных труб нагревается до заданных параметров. Греющий пар подается в корпус аппарата (2), проходя трубный пучок (3), конденсируется на наружной поверхности труб. Конденсат греющего пара (КГП) сливается через патрубок (4).

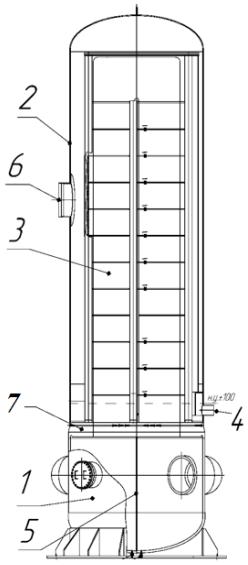
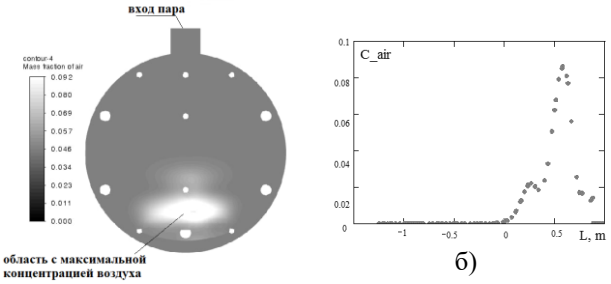


Рисунок 1 - Общий вид подогревателя
(1 – камера водяная, 2 - корпус, 3 - система трубная, 4 – патрубок слива КГП, 5 - перегородка, 6 - патрубок подвода пара, 7 – доска трубная);

Так как поверхность теплообмена состоит из большого количества теплообменных труб (8 -10 тысяч), методика основана на эквивалентной замене трубного пучка эффективной пористой средой. Использование известных эмпирических зависимостей [3, 4] позволяет учитывать влияние следующих факторов: присутствие в паре неконденсирующихся газов, геометрические характеристики трубного пучка, наличие нескольких ходов по нагреваемой среде, конфигурацию отсасывающего устройства, изменение температуры основного конденсата по ходу движения среды в трубах.



а) б)

Рисунок 2 - Распределение массовой концентрации воздуха (а - в поперечном сечении трубного пучка; б - вдоль прямой от входа пара до отсасывающего устройства).

На рисунках 2а и 2б представлены результаты распределения массовой концентрации воздуха в трубном пучке. Максимальная концентрация неконденсирующихся газов сосредоточена в месте расположения воздухоудаляющего устройства.

В рамках выполнения настоящей работы применялось численное моделирование с применением вычислительной газодинамики, была выполнена проверка работоспособности автоматизированной методики, а также выданы рекомендации для вновь разрабатываемых конструкций.

Список литературы:

1. РТМ 108.271.23-84 Расчет и проектирование поверхностных подогревателей высокого и низкого давления/ НПО ЦКТИ им. И.И. Ползунова/ 1987 г., 216 стр.
2. РД 24.035.05-89 Методические указания. Тепловой и гидравлический расчет теплообменного оборудования АЭС/ НПО ЦКТИ им. И.И. Ползунова/ 1991 г., 212 стр.
3. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям/ Под ред. М. О. Штейнберга.— 3-е изд., перераб. и доп.— М.; Машиностроение, 1992.— 672 с: ил.
4. Rose J.W. Approximate equations for forced convection condensation in the presence of a non-condensing gas on a flat plate and horisontal tube, Int. J. Heat Mass Transfer 23, 519-528 (1984).

УДК 536.2

ТЕПЛООТДАЧА В КАНАЛЕ С ВНУТРЕННИМИ ИНТЕНСИФИКАТОРАМИ ПРИ ЦИРКУЛЯЦИИ АЗЕОТРОПНОЙ СМЕСИ

Жуков В.Е.[1], Мезенцева Н.Н.[1]

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

Использование смесей в качестве хладагентов и теплоносителей в различных энергетических системах получило широкое распространение [1-3]. Теплофизические свойства смеси отличаются от свойств отдельных компонентов. Следует отметить, что процесс парообразования в однокомпонентных жидкостях и смесях протекает по-разному. Коэффициент летучести для компонентов неазеотропной бинарной смеси существенно различается. В азеотропной бинарной смеси коэффициенты летучести для обеих компонент одинаковы. В [4] проведены эксперименты на существенно неазеотропной спирто-водяной смеси массовой концентрации 20% при циркуляции в гладком канале длиной 4 м. Было показано, что интенсивное испарение легколетучего компонента приводит к значительному обеднению смеси на выходе канала. В [5] приведены экспериментальные исследования при циркуляции этой же смеси в канале со спиральными интенсификаторами. Одной из особенностей кипения неазеотропной смеси являются диффузионные процессы, обусловленные градиентом концентраций в перегретом слое жидкости у стенки и вблизи границы раздела жидкость-пар, что ведет к существенному снижению интенсивности теплоотдачи при кипении [6]. В данной работе приведены результаты экспериментального исследования интенсивности теплоотдачи к азеотропной спирто-водяной смеси при вынужденной циркуляции в круглом обогреваемом канале. Эксперименты проводились как в гладком канале, так и в канале со спиральными интенсификаторами.

Исследования проводились в канале из нержавеющей стали. Внутренний диаметр канала 7.6 мм, толщина стенки – 0.2 мм. Обогрев канала осуществлялся прямым тепловыделением в стенке за счет протекания электрического тока. Канал длиной 4 м состоит из двух секций по 2 м. Первая секция гладкий канал, во второй секции установлен внутренний спиральный интенсификатор. Поверхность интенсификатора покрыта фторопластом, диаметр спиральной проволоки 0.9 мм, шаг навивки 4 мм. Соотношение внутреннего диаметра спирали (d) к внутреннему диаметру канала (D) равно $D/d = 0.76$. По длине канала на внешней стороне стенки установлены 13 тонкопленочных платиновых термометров сопротивления HEL-700, измеряющих температуру стенки. Из них 3 термометра были установлены на верхней образующей канала, а остальные 10 на нижней образующей. Для измерения перепада температуры потока по длине канала были установлены термометры перед входом в обогреваемую часть канала и за обогреваемой частью канала. В начале канала, между секциями и в конце канала установлены датчики давления. Также давление измерялось в накопительном сосуде, из которого подавалась жидкость в рабочий участок и возвращался одно- либо двухфазный поток после прохождения канала рабочего участка. В этом же сосуде установлен теплообменник для эвакуации из замкнутой системы тепла, подаваемого на рабочий участок. Циркуляция теплоносителя через теплообменник осуществлялась криотермостатом. Циркуляция исследуемой смеси осуществлялась плунжерным дозирующим насосом с возможностью регулировки объемного расхода через 0.5%. Для сглаживания пульсаций плунжерного насоса на его выходе установлен сильфонный демпфер. На входе в рабочий участок установлен турбинный расходомер. За рабочим участком установлен стеклянный оптический участок, позволяющий регистрировать появление двухфазного потока.

Исследования проводились на смеси с массовой концентрацией этанола 95%. Абсолютное давление в сосуде поддерживалось в пределах 0.03-0.04 МПа. Диапазон массовых расходов жидкости через канал 36 – 363 кг/м^{2}с, плотность теплового потока – 8000 – 32000 Вт/м^2. Тепловыделение осуществлялось либо на гладком участке канала, либо на участке со спиральными интенсификаторами. При определении температурного напора в локальных точках по длине канала локальная температура жидкости определялась из теплового баланса. Для определения локальной температуры насыщения смеси было принято линейное распределение давления по длине рабочего участка.

При фиксированной тепловой нагрузке, изменяя массовый расход, реализованы различные режимы теплообмена в канале – от теплообмена к однофазному потоку до практически полного осушения канала.

Список литературы:

1. Бабакин Б.С., Стефанчук В.И., Ковтунов Е.Е. Альтернативные хладагенты и сервис холодильных систем на их основе. М.: Колос. 2000. 160 с.
2. Цветков О.Б. Современные хладагенты, хладоносители и проблемы экологии // Холодильная техника. 2008. №1. С. 30-34.
3. Бараненко А.В., Кириллов В.В., Сивачев. О выборе хладоносителя для систем косвенного охлаждения // Вестник Международной академии холода. 2010. № 2. С. 22-24.
4. Zhukov V., Mezentseva N., Sukhorukova E. Heat transfer in a round channel with circulation of a non-azeotropic mixture //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2023. – Vol. 459. – P. 05015.
5. Zhukov V.E., Mezentseva N.N. Heat Transfer in Circular Channel with Spiral Intensifiers during Circulation of Non-Azeotropic Alcohol-Water Mixture // Journal of Engineering Thermophysics.– 2023. – Vol. 32, No. 4. –P. 1–14.
6. Гогонин, И.И. Теплообмен при кипении бинарных смесей в условиях свободной конвекции // Инженерно-физический журнал. – 2013. – Т.86, №3. – С. 646-651.

Исследование выполнено в рамках ГЗ ИТ СО РАН по теме №121031800216-1.

УДК 536.26

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ПРИ РОСТЕ ОДИНОЧНОГО ПАРОВОГО ПУЗЫРЯ В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ

Зорькина А.И.[1,2], Роньшин Ф.В.[1,2], Кабов О.А.[1]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова 2

Кипение – процесс, являющийся неотъемлемой частью во многих областях промышленности, в частности благодаря высокому коэффициенту теплоотдачи широко применяется для охлаждения компонентов электронной аппаратуры. Теплообменные системы с фазовыми переходами активно используются и в космической отрасли, что требует тщательных исследований поведения данного процесса в условиях микрогравитации. Для более детального изучения и лучшего понимания характеристик теплопередачи при кипении, в настоящей работе рассматривается рост одиночного парового пузыря на поверхности нагрева в условиях микрогравитации при строго контролируемых параметрах эксперимента. Эксперимент был проведен в рамках многомасштабного проекта по кипению RUBI (Reference mUltiscale Boiling Investigation), реализованному на Международной космической станции в период с 2019 по 2021 год [1].

Экспериментальная установка представляет собой ячейку, заполненную диэлектрической жидкостью FC-72. Джоулевый нагреватель – слой хрома толщиной 800 нм, напылен на прозрачную в ик диапазоне подложку из фторида бария. Пузырь инициализируется лазерным импульсом длительностью 20 мс в центре нагревателя, в специальной каверне глубиной 200 мкм, через определенное время после включения нагрева, названное в настоящей работе временем ожидания t_{wait}. Установка снабжена скоростными черно-белой с частотой 500 Гц, расположенной сбоку экспериментальной ячейки и записывающей форму пузыря, и инфракрасной, расположенной снизу и регистрирующей поля температур нагревателя с частотой 240 Гц, камерами. В работе варьируются следующие параметры эксперимента: время предварительного нагрева t_{wait} (2 – 5 с) и давление жидкости p (500, 600, 750 мбар). Усредненная по площади постоянная плотность теплового потока с джоулева нагревателя q = 0,5 Вт/см^2, температура недогрева жидкости до температуры насыщения T_{sub} = 1 °C. Подробное описание установки и обработки черно-белой скоростной визуализации представлено в работах [1, 2].

Для определения тепловых потоков с поверхности нагрева в жидкость в программной среде Matlab численно решено трехмерное уравнение теплопроводности в подложке методом дробных шагов. С учетом того, что все тепло, поступающее от нагревателя уходит либо в жидкость, либо в подложку, рассчитываются тепловые потоки, отводимые в жидкость. Для верификации данного подхода, в программном комплексе Comsol Multiphysics также решена сопряженная задача теплообмена для подложки и прилегающего к нему слоя жидкости без моделирования парового пузыря. Рассчитанные данным методом тепловые потоки аналогичны результатам, полученным через написанный в программе Matlab код.

Вычислены количество теплоты: необходимое на образования пузыря данного объема $Q_{полное}$, переносимое с области контактной линии $Q_{контактная\ линия}$, с межфазной границы жидкость-пар $Q_{жидкость}$, и с центра под пузырем $Q_{центр}$ (см. рис. 1).

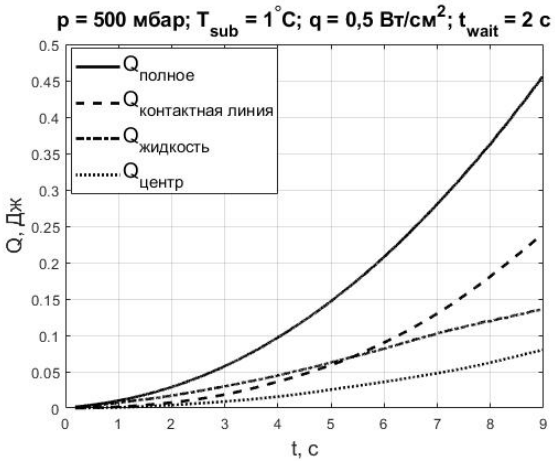


Рис. 1. Количество теплоты, необходимое на образование пузыря данного объема и переносимое с различных областей

Область контактной линии вносит существенный вклад в рост пузыря, на последних стадиях достигает 50 %. На начальных этапах роста, данный вклад может быть недооценен ввиду малых диаметров контактной линии и недостаточного разрешения ик камеры.

Также проанализировано влияние параметров эксперимента (p и t_{wait}) на количество теплоты, переносимое с различных зон. Определено уменьшение $Q_{контактная\ линия}$ с увеличением давления за счет уменьшения коэффициента удельной теплоты парообразования и уменьшения площади поверхности, с которой происходит испарение жидкости, а также увеличение $Q_{контактная\ линия}$ при увеличении времени предварительного нагрева t_{wait}, обусловленное увеличением площади поверхности, с которой происходит испарение жидкости и увеличением градиента температуры.

Список литературы:

1. Sielaff A. et al. The multiscale boiling investigation on-board the International Space Station: An overview //Applied thermal engineering. – 2022. – С. 117932.
2. Oikonomidou O. et al. Bubble growth analysis during subcooled boiling experiments on-board the international space station: Benchmark image analysis //Advances in Colloid and Interface Science. – 2022. – С. 102751.

УДК 532.516

РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ БОРЬБЫ С ОБЛЕДЕНЕНИЕМ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ В АРКТИКЕ

Кабардин И.К.[1], Меледин В.Г.[1], Двойнишников С.В.[1], Янчат Т.Н.[1], Мухин Д.Г.[1], Гордиенко М.Р.[1], Какаулин С.В.[1], Ледовский В.Е.[1], Зубанов К.С.[1], Зуев В.О.[1]

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

Работа направлена на решение фундаментальной научной задачи по эффективному использованию огромного возобновляемого энергетического ресурса Арктики и восточного побережья РФ - кинетической энергии атмосферного пограничного слоя с помощью ветрогенераторов, которые сейчас являются одним из видов экологически чистой и ресурсосберегающей энергетики. Задача проекта связана с поиском оптимальных решений для борьбы с обледенением - одной из основных проблем, сдерживающих эффективное использование ветрогенераторов для автономного энергоснабжения отдаленных населённых пунктов крайнего севера. Сейчас эта тематика перспективна и очень актуальна для обеспечения динамического развития энергетики в Арктических и отдаленных регионах Сибири. Эффективное решение поставленных задач в области ветроэнергетики с учетом их обобщения для применения к другим объектам жизнедеятельности может стать прорывной темой при решении данной проблемы для других направлений развития Арктического региона, что подчёркивает принципиальную важность развития этих знаний в целом.

Вращающиеся роторы ветрогенераторов являются наиболее сложными объектами для изучения воздействия обледенения. Здесь возникает комплекс проблем: ухудшаются аэродинамические характеристики лопастей, снижается производительность, увеличивается вес лопастей и происходит нарушение балансировки ротора. Данный комплекс проблем приводит к тому, что ветрогенераторы часто приходится останавливать во избежание их поломки или опасности отрыва кусков льда от лопастей. В рамках работы проведен поиск наиболее эффективной стратегии по борьбе с обледенением лопастей ветрогенераторов в климатических условиях, характерных для арктического побережья, включая изучение эффективности новой технологии для ветрогенераторов по использованию супергидрофобных покрытий.

В условиях сложных аэродинамических потоков исследована эффективность новых противообледенительных систем на базе защитных ИСГ плёнок с иерархическими размерами нано-структур от 50 нанометров до 100 мкм, фторполимерных напыленных покрытий, покрытий с поверхностью модифицированных лазерным излучением и покрытиями «Грифтек» на основе фторопласта от ИММС Республики Беларусь.

Проведены комплексные исследования и испытания, включающие проверку эффективности исследуемого типа противообледенительной нанопокрытий в климатической аэродинамической трубе Института теплофизики СО РАН. В рабочем участке установки с помощью водораспыливающей системы создавался водокапельный поток холодного воздуха, контролируемый средствами измерений технологических параметров установки, физических характеристик параметров потока и исследуемых моделей.

Для экспериментов использовались две климатических аэродинамических трубы. Первая установка со следующими элементами: рабочий канал квадратного сечения (размеры по внутренней части 200х200 мм), Температурный диапазон работы от – 25 до 40 º С. Вторая климатическая установка обеспечивала минимальную температуру минус 22 º С, скорость потока - 3 м/с. В качестве профиля для изготовления элементов лопастей ветрогенератора использован профиль RG-15. Элементы лопастей напечатаны на 3D принтере. Лопатка помещалась в рабочий участок. Имелась возможность установки различного угла атаки.

Проведена серия экспериментов с оценкой геометрии и массы ледового покрытия. Сделана оценка влияния режима работы на обледенение. Исследовано обледенение при постоянной концентрации водных капель в аэрозоле и температуре для скорости набегающего потока 10 м/с в диапазоне углов атаки от 0 до двойного оптимального 16 градусов. Проведено исследование образования льда на поверхности участков лопастей с различными гидрофобными покрытиями при климатических условиях без образования наледи и с интенсивным образованием наледи. Проверена износостойкость к обледенению указанных покрытий и исходного покрытия элемента лопасти. Образцы монтировались на поверхности исследуемой лопасти для обеспечения одинаковости условий экспериментов.

Список литературы:

1. Зуев В.О., Двойнишников С.В., Рахманов В.В., Садбаков О.Ю. Измерение геометрических параметров наледи методом фазовой триангуляции в ограниченном объеме с преломлением оптических сигналов// Теплофизика и аэромеханика. - 2023 . – Т 30, №1. – С. 121-126.
2. Kabardin I.K., Meledin V.G., Dvoynishnikov S.V., Stepanov K.I., Mukhin D.G., Zuev V.O., Gordienko M.R., Kakaulin S.V., Zezyulin I.V., Ledovsky V.E., Zubanov K.S. Features of the use of plastic polymer nanostructured coatings for protection against icing of industrial structures// Journal of Engineering Thermophysics. -2023 .- Vol. 32, No.1 . – P. 54-61.

Работа выполнена при поддержке госзадания ИТ СО РАН.

УДК 544

КИНЕТИКА СПОНТАННОГО ВСКИПАНИЯ И ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ РАСТВОРА ПРОПАН–МЕТАН

Каверин А.М.[1,2], Андбаева В.Н.[1,2], Билюкова М.Р.[1,2], Панков А.С.[1], Хотиенкова М.Н.[1]

[1] Институт теплофизики УрО РАН,
620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 107а
[2] Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19

Методом измерения времени жизни [1] исследована кинетика спонтанного вскипания перегретого раствора пропан–метан с содержанием метана $x = 0.4$ моль %. Жидкость объемом $V = 63$ мм^3 перегревалась в стеклянных ячейках. Заход в метастабильную область осуществлялся резким понижением давления до заданного при фиксированных значениях температуры и состава раствора. Измерения времен жизни (ожидания вскипания) τ проведены по изобарам 1.3, 1.6 и 1.9 МПа в интервале частот зародышеобразования $J = 3\cdot10^4 - 2\cdot10^8$ м$^{-3}$с$^{-1}$.

В опытах визуально установлен резкий («взрывной») характер вскипания перегретой жидкости во всем исследованном интервале параметров. При $\tau < 2.5$ с ($J > 6.2\cdot10^6$ м$^{-3}$с$^{-1}$) наблюдается сильная зависимость частоты зародышеобразования от температуры: $\left(\partial \lg J/\partial T\right)_p = 6 \div 7$ (см. рис. 1). Мы связываем это с проявлением гомогенного (флуктуационного) механизма образования в жидкости паровых зародышей. При меньших значениях J вскипание происходит под действием естественного радиационного фона, космического излучения и других инициирующих факторов. Растворение метана приводит к понижению температуры достижимого перегрева T_n раствора. При $J = 10^7$ м$^{-3}$с$^{-1}$ значения T_n для исследованных изобар составляют, соответственно, 336.8, 339.9, 343.0 К, что на ~ 1 К ниже температур достижимого перегрева чистого пропана.

Основным параметром, определяющим кинетику вскипания перегретой жидкости, является ее поверхностное натяжение. Поверхностное натяжение раствора пропан–метан σ определено используя метод капиллярного поднятия в его дифференциальном варианте. Опыты проведены по изотермам в интервале температур 328.15 – 353.15 К, от давления насыщения чистого растворителя (пропана) до 4 МПа. Схема экспериментальной установки и методика проведения эксперимента представлены в работах [2, 3]. На каждой изотерме получено от 4 до 6 значений капиллярной постоянной. Состав сосуществующих фаз раствора и значения ортобарических плотностей определены по равновесному значению давления, используя уравнение состояния GERG-2004 [4]. Максимальная концентрация метана в исследуемом растворе не превышает 15 моль % при максимально допустимом давлении в эксперименте (~ 4 МПа).

Увеличение доли растворенного вещества (метана), как и увеличение температуры, приводит к уменьшению поверхностного натяжения раствора (см. рис. 1). В представленной работе получены уравнения, описывающие концентрационную и барическую зависимости поверхностного натяжения раствора пропан–метан в исследованном диапазоне параметров. Концентрационная зависимость поверхностного натяжения описана зависимостью вида:

$$\sigma = \sigma_0 + C_1 \cdot x + C_2 \cdot x^2,$$

где σ_0 – поверхностное натяжение чистого пропана [5], C_1, C_2 – квадратичные функции температуры, x – концентрация метана в жидкой фазе. Аналогичный вид концентрационной зависимости поверхностного натяжения был получен для системы метан–азот [5].

Полученные значения σ использованы при расчете T_n раствора по теории гомогенной нуклеации. Результаты теоретического расчета T_n сопоставлены с экспериментальными данными.

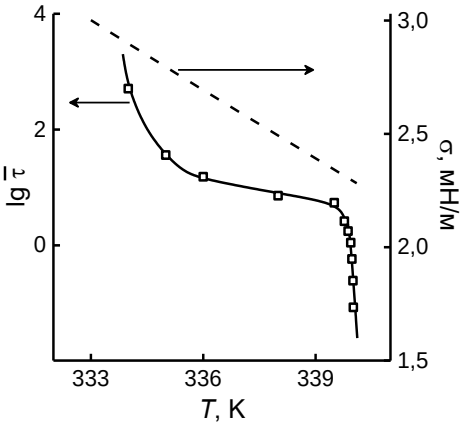


Рис. 1. Температурная зависимость логарифма среднего времени жизни при $p = 1.6$ МПа (сплошная линия) и поверхностного натяжение при $x = 0.4$ моль % (пунктирная линия) раствора пропан–метан

Список литературы:

1. Скрипов В.П. Метастабильная жидкость. М.: Наука, 1972. 312 с.
2. Andbaeva V.N., Baidakov V.G. Capillary constant and surface of hydrogen and helium solutions in *n*-butane (R600) // Fluid Phase Equilibria. 2023. V. 565. 113644.
3. Андбаева В.Н., Хотиенкова М.Н. Капиллярная постоянная и поверхностное натяжение раствора изобутан–водород в интервале температур 298-348 К // Известия РАН. Серия физическая. 2023. Т. 87. № 11. С. 1541-1546.
4. Kunz O., Klimeck R., Wagner W., Jaeschke M. The GERG-2004 wide-range equation of state for natural gases and other mixtures. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2007. 555 p.
5. Байдаков В.Г., Сулла И.И. Поверхностное натяжение пропана и изобутана при температурах, близких к критической // Журнал физической химии. 1985. Т. LIX. № 4. С. 955-957.
6. 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.

УДК 536.423

КИПЕНИЕ ЖИДКОСТИ В КАНАЛЕ С ГРАФЕНОВЫМ ПОКРЫТИЕМ

Кочкин Д.Ю., Зайцев Д.В., Белослудцев В.В., Архипов В.Е., Кабов О.А.

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

Кипение жидкости встречается во многих технологических процессах, в том числе в системах термостабилизации, где отвод тепла происходит за счет скрытой теплоты парообразования. Одним из способов интенсификации теплообмена при кипении являются нанопокрытия. В представленной работе экспериментально исследовался процесс кипения воды в миниканале с локальным нагревателем, покрытым графеном.

Эксперименты проводились на рабочем участке, представляющем собой плоский миниканал шириной 30 мм и высотой 1 мм с нагревателем 10x10 мм^2 на нижней стенке канала. Верхняя стенка канала выполнена из стекла, что позволяет проводить визуализацию процесса кипения. Нижняя стенка канала – пластина из нержавеющей стали со встроенной заподлицо сменной подложкой из меди, которая нагревается снизу медным стержнем. В качестве источника тепла используются омические нагреватели. Тепловой поток определяется при помощи термопар, встроенных в медный стержень и пластину из нержавеющей стали. Жидкость подается в миниканал при помощи регулируемого насоса. Расход жидкости измеряется при помощи ультразвукового расходомера. В качестве рабочей жидкости используется сверхчистая дистиллированная вода Milli-Q.

На рисунке 1 представлена динамика кипения воды на медной подложке, одна половина которой была покрыта графеном, в то время как со второй половины подложки графен был удален, чтобы явно исследовать разницу в динамике паровых пузырей и частоте нуклеации в одинаковых условиях. Для сравнения динамики паровых пузырей на двух поверхностях использовались усредненные данные (рис. 2), полученные при обработке нескольких паровых пузырей. Как можно заметить, на начальном этапе роста динамика паровых пузырей практически одинакова для обоих типов поверхности, однако на медной поверхности без графена максимальный размер парового пузыря несколько больше, чем на поверхности, покрытой графеном. Стоит отметить, что в ходе экспериментов на поверхности, покрытой графеном, наблюдалось значительно большее количество пузырей, чем на поверхности без графена, что свидетельствует о более высоком коэффициенте теплоотдачи по сравнению с «чистой» медной поверхностью.

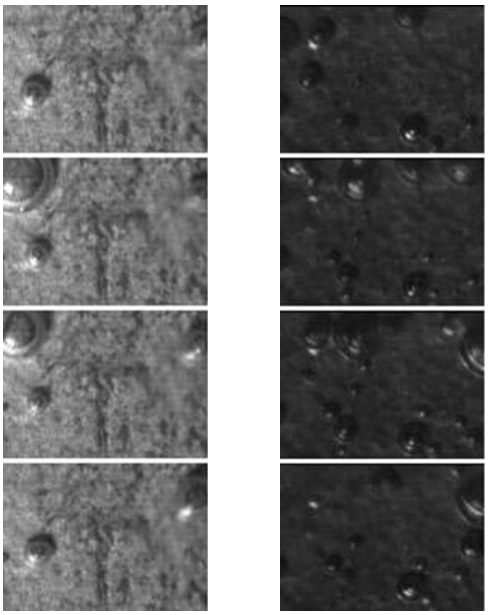


Рис. 1. Характерная картина кипения на медной подложке (слева) и медной подложке покрытой слоем графена (справа). Порядок кадров сверху вниз, временной интервал между кадрами 5 мкс. Температура стенки 128 °С. Размер области визуализации 618x464 мкм.

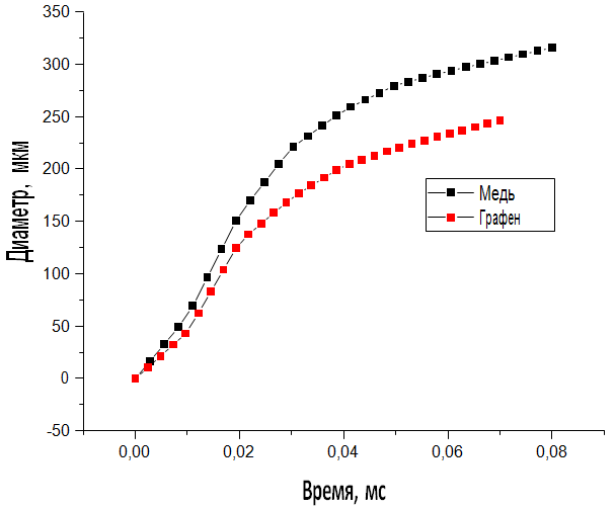


Рис. 2. Осредненная динамика паровых пузырей на «чистой» медной подложке и медной подложке, покрытой графеном.

Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 22-49-08018

УДК 536.242

ВЛИЯНИЕ ПОРИСТЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ, НА ТЕПЛООБМЕН И КРИЗИСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ КИПЕНИИ АЗОТА, ВКЛЮЧАЯ РЕЖИМЫ НЕСТАЦИОНАРНОГО НАГРЕВА И ОХЛАЖДЕНИЯ

Кузнецов Д.В., Павленко А.Н.

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

Возрастающие мощности тепловыделения энергонапряжённых устройств стимулируют развитие методов повышения коэффициентов теплоотдачи и критических тепловых потоков (КТП) при кипении. На сегодняшний день наиболее популярными и эффективными методами являются методы, связанные с модификацией поверхности теплообмена. Активно ведется поиск наиболее оптимальных для практического использования морфологии и геометрических параметров модифицированных поверхностей при заданных режимных параметрах. Кроме того, в связи с развитием темы высокотемпературной сверхпроводимости, непосредственный интерес представляет исследование интенсификации теплообмена при кипении криогенных жидкостей. Однако, на сегодняшний день количество современных работ в данной области, особенно системных, крайне ограничено.

Целью настоящей работы является анализ, систематизация и обобщение ранее полученных экспериментальных данных по влиянию пористых покрытий, полученных различными методами и отличающимися микроструктурными параметрами, на теплообмен и кризисные явления при кипении азота, включая режимы нестационарного нагрева и охлаждения.

В рамках исследования использовались модифицированные нагреватели с трехмерными капиллярно-пористыми (ТКП) покрытиями, полученными методом направленного плазменного напыления [1], которые представляли собой квазиупорядоченные пористые гребни и каналы; пористые покрытия, полученные методом 3D-печати [2], со схожей геометрической структурой (синусоидальная зависимость профиля); а также покрытия, полученные методом микродугового оксидирования (МДО) [3], с поверхностной пористостью и высокой плотностью пор малого диаметра.

Показано, что модификация гладких нагревателей вышеперечисленными методами, может приводить к существенной интенсификации коэффициентов теплоотдачи и увеличению критических тепловых потоков при кипении жидкого азота в большом объеме в условиях стационарного тепловыделения. На основе анализа данных высокоскоростной видеосъемки можно выделить основные механизмы, способствующие увеличению количества тепла, отводимого от нагреваемой поверхности относительно гладких рабочих участков: увеличение плотности активных центров парообразования; наличие большого числа центров со стабильной парогенерацией в области низких тепловых нагрузок; увеличение эффективной площади теплообмена и стабильная капиллярная подпитка нагревателя; увеличение количества тонких менисков жидкости между паровой и твердой фазами. Увеличение критических тепловых потоков на структурированных пористых покрытиях, вероятно, связано с эффективной модуляцией двухфазного потока вблизи теплоотдающей поверхности. Стоит отметить, что интенсивность теплоотдачи существенно зависит от микроструктурных параметров используемых покрытий: размеры пор, толщина покрытия, расстояние между соседними гребнями, пористость и т. д.

Кроме того, для нагревателей с ТКП покрытиями были проведены эксперименты в условиях нестационарного нагрева и охлаждения. Так, в частности, при импульсной подаче тепловой нагрузки на модифицированных образцах наблюдалось вырождение нестационарного критического теплового потока, а быстрый переход к пленочному кипению происходил при тепловых потоках в 2 раза превышающих стационарный КТП. Такой результат связан с меньшей долей тепла, аккумулирующейся в пристенном слое жидкости в момент закипания, и отсутствием самоподдерживающихся фронтов испарения, распространяющихся вдоль поверхности нагревателя. В экспериментах по повторному смачиванию сильно перегретых медных пластин, наличие ТКП покрытия приводило к значительному снижению (более чем в 2 раза) времени полного охлаждения участка [4]. Более быстрое охлаждение перегретой модифицированной пластины обусловлено смачиванием теплоотдающей поверхности при более высоких температурных напорах и последующим быстрым возникновением и развитием зон переходного и пузырькового режимов кипения.

Список литературы:

1. Surtaev A. S. et al. Heat transfer and crisis phenomena at pool boiling of liquid nitrogen on the surfaces with capillary-porous coatings // IJHMT. 2017. Т. 108. С. 146-155.
2. Pavlenko A. N., Kuznetsov D. V., Bessmeltsev V. P. Heat Transfer Enhancement during Pool Boiling of Nitrogen on Porous Coatings Produced by Selective Laser Melting/Sintering (SLM/SLS) // JET. 2022. Т. 31. №. 1. С. 1-10.
3. Kuznetsov D., Pavlenko A. Heat Transfer during Nitrogen Boiling on Surfaces Modified by Microarc Oxidation // Energies. 2022. Т. 15. №. 16. С. 5792.
4. Pavlenko A. N., Kuznetsov D. V. Experimental study of the effect of structured capillary-porous coating on rewetting dynamics and heat transfer at film cooling by liquid nitrogen // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing. 2018. Т. 1105. №. 1. С. 012053.

УДК 536.242

ИЗМЕРЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ЦЕНТРОВ ПАРООБРАЗОВАНИЯ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ВСКИПАНИИ ВОДЫ

Левин А.А., Хан П.В.

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 130

Плотность центров парообразования является ключевой характеристикой многих процессов, связанных с фазовыми переходами. Количество публикаций с ее упоминанием за последние 50 лет возросло экспоненциально до 1700 за 2023 год согласно статистики Scopus, из них около 40 за 2023 год касаются непосредственно пузырькового кипения. Поиск наилучших обобщений для плотности центров парообразования, как и для других важнейших параметров, например, отрывного диаметра и частоты нуклеации, продолжается по сей день, благодаря расширяющимся возможностям средств оптической диагностики. Немаловажным аспектом этой проблемы является и учет возможной нестационарности процесса кипения. Ранее авторами настоящего исследования было экспериментально установлено [1], что в диапазоне данных $dT_w/d\tau$ = 2.4÷5.4 К/мс изменение плотности центров нуклеации в зависимости от температуры нагревателя успешно описывается обобщающей кривой при условии, что началом отсчета выбрана температура появления первого парового пузырька – T_{onb}. При этом зависимость плотности центров нуклеации от температуры является экспоненциальной функцией, аналогичной по виду [2]. В то же время, становится очевидным возможность обнаружения все более мелких пузырьков пара и их взаимодействия, что потенциально может оказать влияние на процесс теплопередачи. Вопрос оценки влияния соседних центров нуклеации в настоящее время изучен весьма слабо. Лишь в недавней работе [3] экспериментально показано, что нельзя пренебрегать влиянием на частоту нуклеации при наличии в некоторой окрестности активных центров. С целью определения общего баланса тепла в пристенном слое жидкости в [4] исследованы влияние учета различного типа взаимодействия паровых пузырьков. Экспериментальная работа [5] подтверждает важность одновременных наблюдений за характеристиками множества центров нуклеаций, так как результаты полученные при исследовании изолированного центра могут отличаться более чем на 50%.

В настоящем докладе будут представлены результаты экспериментального исследования нестационарного кипения, вызываемого быстрым ростом температуры металлического нагревателя, охлаждаемого потоком недогретой до температуры насыщения водой. Нагреватель – полый стальной цилиндр с толщиной стенки 1 мм, внешним диаметром 12 мм и длиной 120 мм, поверхность которого характеризуется средней шероховатостью 0.9 мкм и максимальной шероховатостью 4 мкм, вертикально расположен внутри канала с сечением 18 на 18 мм. Начальное давление в канале составило 0.29 МПа, средняя скорость восходящего потока воды 0.52 м/с, недогрев до температуры насыщения ΔT_{sub} = 23, 83 и 103 К, а скорость роста температуры нагревателя при импульсном нагреве варьировалась в различных опытах от 250 до 19000 К/с. Длительность импульсов нагрева составила от 11 до 500 мс, что обеспечивало реализацию всех этапов развития пузырькового кипения, включая образование крупных пузырьковых агломератов и кратковременный выход в режим плёночного кипения. Обзор и регистрация паровых структур на поверхности стального нагревателя проводилась через прозрачную внешнюю стенку канала скоростной видеокамерой Phantom V2012 с частотой 180 кГц при разрешении 256 на 256 пикселей. Пространственное разрешение съемки составило 5.5 мкм на пиксель, что позволило регистрировать пузырьки размером от 11 мкм с временем жизни выше 11 мкс. Для определения температуры теплоотдающей поверхности использовались данные видеосъемки о режимах кипения, интерполяция показаний термопар, прикрепленных к внутренней поверхности нагревателя, а также численный расчет нестационарного теплообмена, реализованный в Comsol Multyphysics. Результаты проведенного исследования сравнивались с ранее полученными сведениями о плотности центров парообразования, что позволяет судить о возможностях распространения имеющихся предсказательных моделей пузырькового кипения на нестационарные режимы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00628, https://rscf.ru/project/23-29-00628/

Список литературы:

1. Levin, A.A., Khan, P.V. Characteristics of nucleate boiling under conditions of pulsed heat release at the heater surface // Applied Thermal Engineering. 2018. 149. pp. 1215–1222.
2. T. Hibiki, M. Ishii, Active nucleation site density in boiling systems // Int. J. Heat Mass Transf. 2003. 46 (14). P. 2587–2601.
3. Tsujimura R., Okawa T. Interference effect of nearby nucleation sites on bubble release frequency in subcooled flow boiling. Applied Thermal Engineering. 2024. 247. P.123078.
4. Levin A., Khan P. Special features of nucleate boiling under the abruptly escalating heat input in subcooled flow. International Heat Transfer Conference. 2023. 193575.
5. Zhao Y., Lin Y.-C., Tang K., Ishii M., Buchanan-Jr J. R. Investigation of nucleate boiling and bubble dynamics at multiple nucleation sites in subcooled boiling flow. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2024. 219. P.124886

УДК 621.03

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООТДАЧИ В ТЕРМОСИФОНЕ ПРИ ВАКУУММЕТРИЧЕСКОМ ДАВЛЕНИИ

Лычаков В.Д., Матяш А.С., Борисов А.О., Балунов Б.Ф.

ОАО «НПО ЦКТИ»,
191167 Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Атаманская, д. 3/6

Полые тепловые трубы (термосифоны) являются перспективными теплопередающими элементами для различных энергетических систем. Термосифоны (ТС) автономны, создают двойной высокотеплопроводный барьер между нагреваемой и охлаждаемой средами, ТС позволяют существенно повысить надёжность и безопасность работы образованных ими теплообменников, обладают малым термическим сопротивлением, просты и автономны в работе и не требуют дополнительных затрат энергии на перекачку теплоносителя.

Широкое применение ТС находят в теплоутилизационных установках металлургических и нефтеперерабатывающих систем. В атомной энергетике существует ряд проектов, предусматривающих использование ТС. ТС рассматривались в проектных проработках систем аварийного расхолаживания реакторной установки ВВЭР 1200 и охлаждения объёмов под защитной оболочкой ядерных энергетических установок в аварийных условиях. ТС также применяются в проектных проработках систем отвода тепла из хранилищ с отработанным ядерным топливом, при охлаждении шахты высокотемпературного газового реактора.

Работа ТС основана на гравитационном принципе с противоточным движением парового потока от зоны испарения к зоне конденсации и обратным движением конденсата этого пара. С целью повышения предельной удельной мощности ТС и снижения разности температур по длине ТС, что целесообразно при малом температурном напоре между греющей и нагреваемой средами, рационально применение циркуляционной вставки, которая позволяет создать внутри ТС контур естественной циркуляции.

При нагреве теплоносителя ТС происходит его подъемное движение за счёт снижения плотности. Энтальпия теплоносителя по мере подъемного движения теплоносителя растёт, а абсолютное давление теплоносителя снижается. При достижении энтальпии, соответствующей энтальпии насыщенных паров, начинается частичное парообразование, приводящее к увеличению создаваемого движущего напора. Пароводяная смесь проходит через адиабатную зону, а затем поступает в зону конденсации ТТ, расположенной в верхней части ТТ, где происходит конденсация пара, после чего конденсат пара вместе с остальным теплоносителем разворачивается на 180° и опускается через внутреннее сечение циркуляционной вставки, таким образом поступая в нижнюю часть ТТ, где вновь происходит разворот теплоносителя на 180°.

Одной из возможных областей применения ТС является отвод низкопотенциального тепла, температура охлаждаемого теплоносителя при этом может находиться в диапазоне от 50 до 100 °С и даже ниже. В этом случае при использовании воды в качестве теплоносителя давление внутри ТС должно быть значительно ниже атмосферного (12 кПа абс. и ниже). Для такого случая литературные рекомендации по расчету теплоотдачи отсутствуют.

Экспериментальная модель

Для подтверждения применимости или корректировки соотношений для расчёта теплоотдачи при конденсации, а также скорости движения среды при естественной циркуляции внутри ТС, приведенных в нормативных документах и литературе была спроектирована и изготовлена модель единичного ТС.

Корпус ТС был изготовлен из трубы Ø 89х3, а внутренняя циркуляционная вставка из трубы Ø 48х2, расстояние от среза циркуляционной вставки до верхнего и нижнего донышек составляло 250 мм, материал корпуса и вставки – нержавеющая сталь. Нижняя часть ТС высотой 3,54 метра обогревалась снаружи гибкими электронагревателями регулируемой мощности, затем теплоноситель проходил через адиабатную зону высотой 0,8 м. Общая высота зоны конденсации составляла 0,6 м, охлаждение осуществлялось водопроводной водой. При проведении экспериментов погружными термопарами измерялись температуры среды на выходе из нижнего среза циркуляционной вставки, а также температуры среды в кольцевом зазоре на выходе из зоны нагрева, в середине и на выходе из адиабатной зоны, а также в точке между двумя охлаждающими кожухами и под верхним донышком ТС. В циркуляционную вставку также была установлена расходомерная диафрагма на которой измерялся перепад давления. Также измерялся перепад давления по зоне нагрева, общий перепад давления по высоте модели, и локальные перепады давления в адиабатной зоне и зоне конденсации.

Теплоносителем внутри ТС была химобессоленная вода, испытания проводились при различных уровнях заполнения ТС.

В результате проведенных испытаний подтверждена применимость соотношений [1] для расчёта конденсации, совмещенной с захолаживанием конденсата, а также для расчёта движущего напора и гидравлического сопротивления [1, 2] при течении двухфазной среды в диапазоне абсолютных давлений от 2 до 66 кПа.

Список литературы:

1. РД 24.035.05-89. Тепловой и гидравлический расчет теплообменного оборудования АЭС. Л.: НПО ЦКТИ, 1991.
2. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. Под ред. М.О. Штейнберга. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.

УДК 536.2; 54.145

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ СПИНОДАЛЬНОМ РАСПАДЕ ЖИДКОГО РАСТВОРА С УЧЕТОМ ВЯЗКОУПРУГИХ ЭФФЕКТОВ

Мелких А.В.[1,2], Скрипов П.В.[2]

[1]Уральский Федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, 620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19

[2]Институт теплофизики УрО РАН, 620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 107а

Доклад посвящен выяснению характерных черт спинодального распада раствора, имеющего нижнюю критическую температуру растворения (НКТР), при его кратковременном перегреве относительно бинодали и спинодали жидкость-жидкость. Согласно данным [1], свойства раствора изобутиловой кислоты в воде демонстрируют асимметрию относительно критической концентрации $c_{кр} = c_{НКТР}$. В частности, фаза раствора, обогащенная водой, не демонстрирует вязкоупругих свойств, а фаза, обогащенная изобутиловой кислотой – демонстрирует.

Как известно, вязкоупругие свойства в смысле течения характерны для неньютоновских жидкостей. В эксперименте исследовался спинодальный распад при импульсном нагреве раствора полипропиленгликоля ППГ-425 в воде методом кратковременного изотермического воздействия [2]. При этом температура нагревателя быстро повышается до заданного значения T_{pl}, а потом поддерживается на таком уровне в течение нескольких миллисекунд. Целью нашей работы было выяснить причину существенной асимметрии плотности теплового потока в среду при спинодальном распаде раствора с НКТР, наблюдаемом в области за спинодалью $T_{pl} > T_{НКТР}$.

По нашему мнению, асимметрия обусловлена вязкоупругими свойствами раствора. Проанализируем зависимость мощности, необходимой для поддержания заданного значения T_{pl} нагревателя-зонда, погруженного в раствор, от времени при постоянной температуре перегрева $T_{pl} > T_{НКТР}$ относительно исходной температуры однородного раствора. Подобная зависимость приведена на рис. 1, параметром служит значение концентрации ППГ-425 в воде.

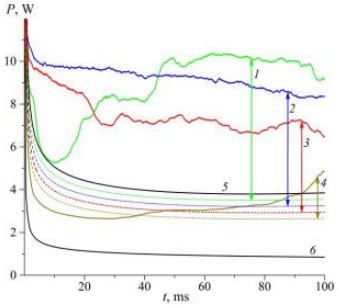


Рис. 1. Зависимость мощности, необходимой для поддержания заданного значения T_{pl} нагревателя-зонда, от времени. Цифры указывают массовое содержание олигомера, %: 1 – 10; 2 – 20; 3 – 30; 4 – 40; 5 – вода; 6 – ППГ-425. пунктиром показаны аддитивные значения раствора, рассчитанные из значений для чистых компонентов.

Если предположить, что напряжение пропорционально концентрации первого компонента, то можно записать для скорости движения капли жидкости:

$$v = \beta\left(c_{кр} - c\right)\eta\left(c - c_{кр}\right),$$

где $\eta\left(c - c_{кр}\right)$ - функция Хевисайда, равная 0 при $c < c_{кр}$ и равная 1 при $c > c_{кр}$.

На основе модели спинодального распада, предложенной ранее [3], запишем уравнение баланса энергии зонда в безразмерном виде

$$P = 2\left(\frac{T-1}{\sqrt{t}}\right)\left(1 + c(1-c)\gamma\left(c_{кр} - c\right)(T-1)\sqrt{t}\right)$$

Здесь T – температура зонда, t – продолжительность поддержания постоянства T, c – концентрация исходного раствора, γ – постоянная величина, характеризующая интенсивность спинодального распада и движения капель. Обнаружено, что кривая $P(t)$ для чистой жидкости (γ=0) идет значительно ниже, чем для раствора, из-за отсутствия спинодального распада, который существенно интенсифицирует теплообмен, см. характерный «взлет» кривых для случая промежуточных концентраций.

В модели показано, что зависимость от концентрации действительно асимметричная. Асимметрия выражается в том, что справа от критической концентрации эффект усиления теплообмена уменьшается или затухает совсем (кривая 4). В таком случае нагреваемый раствор ведет себя как однокомпонентная жидкость. В итоге, понимание сути асимметрии теплообмена при спинодальном распаде раствора будет способствовать оптимальному выбору его концентрации в качестве теплоносителя, применимого в процессе с мощным тепловыделением.

Список литературы:

1. Krall A.H., Sengers, J.V., Hamano, K. Experimental studies of the rheology of a simple liquid mixture during phase separation// 1993. Phys. Rev. E **48**, 357.
2. Volosnikov, D.V., Povolotskiy I.I., Skripov P.V. Enhansement of heat transfer due to decay of unstable stste of solution// Journal of Engineering Thermophysics, 2023, Vol. 32, No. 1, pp. 1–14.
3. Skripov, P.V., Igolnikov, A.A., Rutin, S.B., Melkikh, A.V. Heat transfer by unstable solution having the lower critical solution temperature// International journal of heat and mass transfer. 2022. 184. 122290.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект № 23-69-10006, https://rscf.ru/project/23-69-10006

УДК 536.248.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА И ГИДРОДИНАМИКИ ТЕЧЕНИЯ ОРОШАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ НА ОДНОРЯДНОМ ВЕРТИКАЛЬНОМ ПАКЕТЕ НАКЛОННЫХ ТРУБ ПЛЕНОЧНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

Павленко А.Н.[1], Катаев А.И.[1], Миронова И.Б.[1]

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

В настоящее время в различных отраслях промышленности широко используются витые теплообменники, обеспечивающие эффективный теплообмен между средами через спиральные витки труб при испарении и кипении стекающей плёнки жидкости. Они эффективнее стандартных кожухотрубных аппаратов вследствие значительного увеличения поверхности теплообмена. В витых теплообменных аппаратах в основном используются трубы диаметром 6–10мм, тогда как в кожухотрубных диаметр труб составляет 20–25мм. Исследователями уделяется большое внимание экспериментальному и численному моделированию процессов в этих теплообменниках, а также их геометрическим параметрам и влиянию различных факторов на эффективность их работы [1]. Для этого используются упрощённые экспериментальные модели теплообменников.

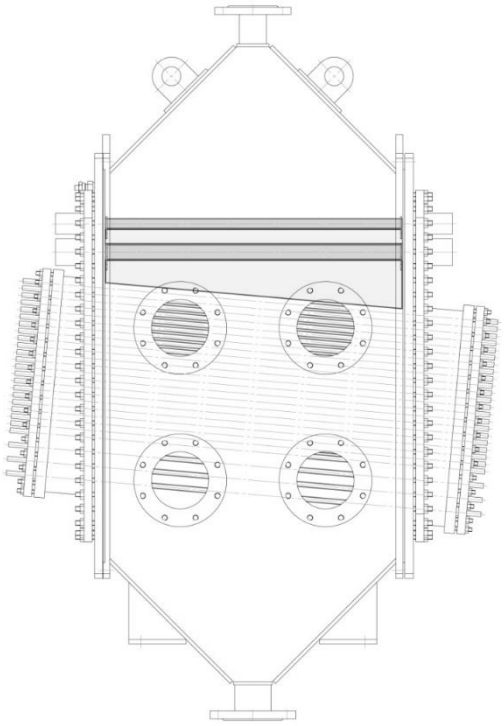


Рис. 1. Сборочный чертёж экспериментального испарителя со смотровыми окнами для наблюдения течения плёнки и установленным под углом 5° пакетом наклонных труб.

На Рис. 1 представлена установка, имитирующая часть витка такого теплообменника в прямоугольном объёме испарителя с оптическими окнами с однорядным наклонным трубным пакетом из 28 дюралюминиевых труб, наклонённых под углом 5° к горизонту, наружный диаметр труб составляет 10 мм, толщина стенки 1.5 мм, длина труб пакета 625 мм, в качестве рабочей жидкости используется хладон R21 при абсолютном давлении внутри оболочки 3 бара, в качестве теплоносителя – вода. Щелевой распределитель жидкости позволяет осуществить частичное орошение пакета для визуального наблюдения течения зон течения плёнки жидкости. Данная установка и схема измерения с горизонтальным пакетом труб подробно описана в [2].

Эксперименты проводились при числах Рейнольдса до 1100. ($Re=\Gamma/\mu$) и плотностях теплового потока в диапазоне 5000 - 10000 Вт/м^2.

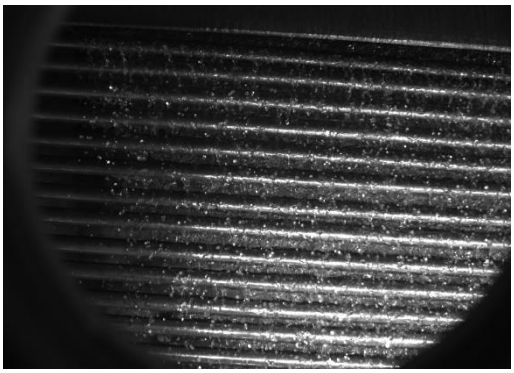


Рис. 2. Картина течения жидкости по пакету труб при значении Re 1100 и максимальном тепловом потоке.

Были получены следующие результаты:

- Проведены эксперименты по измерению теплообмена для различных труб по высоте пакета при разных значениях плотности орошения и теплового потока.
- В области однородного орошения по высоте и ширине пакета наблюдается хорошее совпадение данных по теплообмену для наклонного (5°) и горизонтального пакетов труб.
- В области максимальных тепловых потоков наблюдается переходный режим от испарения к кипению, характеризующийся ростом КТО с 1900 до 2300 Вт/м^2/°С при Re 600-1100.

Работа выполнена в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН при финансовой поддержке Государственного Контракта с ИТ СО РАН № 121031800216-1.

Список литературы:

1. Yan Ren, Yiqiang Jiang, Weihua Cai, Zhiyong Wu , Shulei Li, Numerical study on shell-side saturated boiling heat transfer in spiral wound heat exchanger. Applied Thermal Engineering, 2018, Vol. 140, pp. 657-670.
2. A.N. Pavlenko, A.I. Kataev, I.B. Mironova, Evaporation and boiling heat transfer at film irrigation of horizontal roughened tubes. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, Vol. 32, N. 4, pp. 672-691.

УДК 621.9

ИССЛЕДОВАНИЕ КИПЕНИЯ В ЩЕЛЕВОМ МИКРОКАНАЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СКОРОСТНОЙ ШЛИРЕН-ВИЗУЛИЗАЦИИ И ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ

Павлов И.А.[1,2], Зорькина А.И.[1,2], Роньшин Ф.В.[1,2]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Исследование такого термодинамического процесса, как кипение жидкости в мини- и микроканалах несёт за собой довольно важную цель: установить различные параметры систем, способных передавать энергию от одной среды к другой без существенных потерь. Эти системы называются теплообменными аппаратами. При этом основной вклад несёт именно испарение жидкости. В свою очередь теплоотвод в этом случае характеризирует эффективность теплообменного аппарата.

Различные виды теплообмена встречаются во всех отраслях жизни, однако в некоторых сферах они особенно востребованы: передача тепла первичного теплоносителя, например, от смазочного масла или сжатого воздуха к вторичному теплоносителю в машиностроении; получение необходимых выпаров и взвесей в пищевой промышленности; нагревание и охлаждение различных реагентов с определенными химическими составами в медицине и химической промышленности; активное жидкостное охлаждение центральных процессоров. Для более детального изучения и лучшего понимания характеристик теплопередачи при кипении, в настоящей работе исследуется процесс кипения в щелевом микроканале с использованием скоростной шлирен-визулизации для выделения межфазных границ и инфракрасной термографии для построения полей температур, получение главных описывающих зависимостей процесса.

Экспериментальная установка представляет собой замкнутый контур (см. рис. 1). Система подачи, регулируя расход, доставляет диэлектрическую жидкость Novec 7100 с заданной температурой в микроканал, состоящий из двух пластин: боросиликатного стекла и сапфировый пластины с напыленным нагревателем из оксида индия-олова прозрачном в диапазоне 3 – 5 мкм. Далее, внутри канала, жидкость начинает конвективно нагреваться и, впоследствии, испаряться. При этом центры нуклеации и области коалесценции в изменяющихся двухфазных течениях регистрируются высокоскоростной камерой Phantom® VEO 410 при методе шлирен-визуализации. Температура и давление жидкости и газожидкостного потока дополнительно измеряется на входе и выходе из микроканала с помощью термопар типа К (Омега) с точностью 0,5 °С и датчиков давления BD Sensors. Данные с термопар позволяют производить калибровку значений с ИК-камеры Titanium HD 570M. Результаты калибровок показали повторяемость в диапазоне температур от 20 до 110 °С с погрешностью менее 1 °С. Давление измеряется датчиками BD Sensors на входе в рабочий участок и на выходе. После прохождения микроканала парожидкостный поток охлаждается конденсатором и собирается в резервуар для хранения.

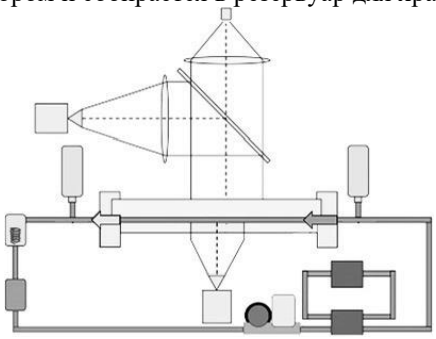


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Исследованы режимы течения в широком диапазоне расходов жидкости (2 – 10 мл/мин) для тепловых потоков 2,5 – 18 Вт/см^2. При небольших величинах тепловых потоков наблюдался конвективный режим теплообмена. При увеличении теплового потока начинали формироваться пузыри в процессе кипения (см. рис. 2).

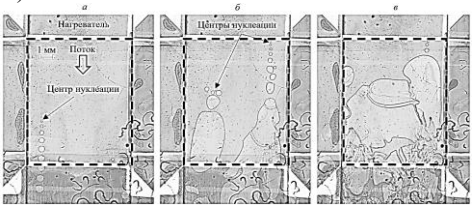


Рис. 2. Режимы течения: *а)* пузырьковый; *б*) вспененный; *в*) кольцевой

После обработки данных были получены основные зависимостей процесса: плотности теплового потока от температурного напора, коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока, перепада давлений в канале от мощности на нагревателе для разных расходов жидкости.

Было установлено, что углы наклона прямых для плотности теплового потока меняются, выходя из зоны недогрева жидкости, что свидетельствует о начале фазового перехода; резкий рост с увеличением расхода для зависимости перепада давлений характеризуют переход от конвективного нагрева к парообразованию; максимальный коэффициент теплоотдачи наблюдается при высоких тепловых потоках, что соответствует кольцевому режиму течения.

Список литературы:

1. Lombaard L. et al. Interaction between multiple bubbles in microchannel flow boiling and the effects on heat transfer //International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2021. – Т. 129. – С. 105703.
2. Mudawar I. Two-phase microchannel heat sinks: theory, applications, and limitations. – 2011.Суржиков С.Т. Перенос излучением в неоднородном слое// ТВТ. 1997. Т. 35. № 3. С. 1-2.

УДК 532.543

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ГРАВИТАЦИОННОГО ОСАЖДЕНИЯ И ИСПАРЕНИЯ ОДИНОЧНОЙ КАПЛИ

Архипов В.А., Басалаев С.А., Золоторёв Н.Н., Перфильева К.Г., Романдин В.И.

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

Закономерности гравитационного осаждения и испарения одиночной капли жидкости играют важную роль в ряде прикладных задач, связанных с экологией, сельским хозяйством, энергетикой и др. [1]. В частности, для повышения эффективности авиационного пожаротушения в труднодоступных местах необходима разработка программного кода для оперативного расчета оптимальных параметров сброса хладагента с борта летательного аппарата в очаг пожара в режиме реального времени и с учетом максимальной безопасности летательного судна и членов экипажа. Основой для данного кода является физико-математическая модель, включающая необходимые влияющие параметры окружающей среды на процесс генерации, осаждения и испарения кластера капель [2]. Данная модель строится на полученных экспериментальных данных по эволюции и генерации большого объема жидкости, динамики осаждения полученного кластера капель в результате деформации и разрушения жидкостного ядра в процессе гравитационного осаждения в изотермических и усложненных условиях (высокотемпературная среда, влияние внешнего воздушного потока, очаг пожара). Для моделирования гравитационного осаждения и испарения жидко-капельного аэрозоля в высокотемпературной газовой среде, необходима информация о режимах осаждения и закономерностях испарения отдельных одиночных капель, входящих в его состав.

В настоящем докладе представлены методика и результаты экспериментального исследования закономерностей осаждения и испарения одиночной капли воды в высокотемпературной среде.

Для определения размера и скорости осаждения одиночной капли воды в воздухе разработана экспериментальная установка, состоящая из систему подачи жидкости, систему подсветки и систему визуализации процесса. Система подачи жидкости включает сосуд Мариотта с исследуемой жидкостью жестко закрепленным с помощью крепежных кронштейнов на штативе, внутренняя полость которого соединена через запорный вентиль и регулировочный дроссель с инъекционной иглой, закрепленной на штативе. В нижней части установки размещена приемная емкость, установленная на аналитических лабораторных весах марки ВК-150.1 с погрешностью ± 10 мг. Для повышения точности результатов измерения изменения массы за счет испарения проводились для 100÷200 идентичных капель. Для определения расстояния, пройденного каплей в плоскости осаждения, используется масштабная линейка с ценой деления 1 мм. Система подсветки состоит из стальной пластины с десятью равномерно распределёнными по длине светодиодными матрицами (напряжение 12 В, мощность 10 Вт). Система визуализации включает скоростную видеокамеру марки MER2-502-79U3C с темпом съемки 450 кадров в секунду.

Для определения скорости испарения одиночной капли воды в высокотемпературной среде произведена модификация ранее представленной установки за счет размещения в области осаждения капли нагревателя, состоящего из трех состыкованных керамических труб с внутренним диаметром 250 мм, общая высота нагревателя составляет 1 м. На внутренней поверхности нагревателя установлены проволочные нихромовые спирали, соединенные с источником напряжения. Тепловая изоляция обеспечивается за счет покрытия наружной поверхности нагревателя тонколистовой сталью, на входе и выходе из нагревателя установлены асбестовые прокладки.

На рис. 1 представлены зависимости скорости испарения W одиночной капли диаметром 2.2, 2.6 и 2.9 мм дистиллированной воды от температуры окружающей среды T. Из рис. 1 следует, что скорость испарения одиночной капли линейно увеличивается с ростом температуры окружающей среды вне зависимости от ее размера. При увеличении исходного диаметра капли скорость испарения повышается.

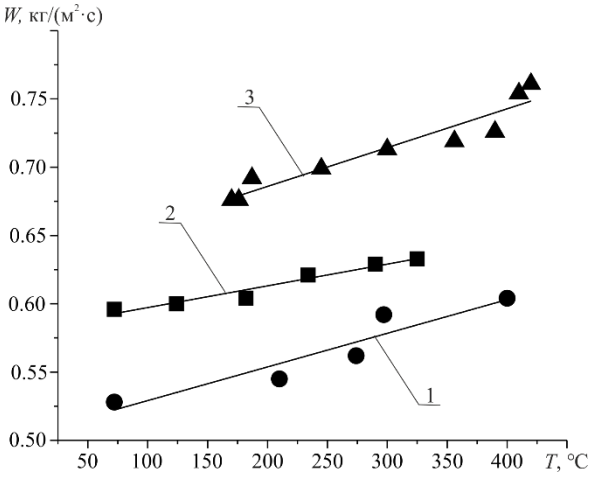


Рис. 1. Зависимость скорость испарения одиночной капли дистиллированной воды от температуры окружающей среды: 1 – D = 2.2 мм, 2 – D = 2.6 мм, 3 – D = 2.9 мм

Список литературы:

1. Испарение и трансформация капель и больших массивов жидкости при движении через высокотемпературные газы / О.В. Высокоморная, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 302 с.
2. Генерация и эволюция жидко-капельного аэрозольного облака в поле силы тяжести / В.А. Архипов, С.А. Басалаев, О.В. Матвиенко, К.Г. Перфильева, А.С. Усанина. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2022. 285 с.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00307, https://rscf.ru/project/22-19-00307/

УДК 536.42

РЕЖИМЫ ВСКИПАНИЯ ЭМУЛЬСИИ ВОДА / РАПСОВОЕ МАСЛО ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМАХ НАГРЕВА

Поволоцкий И.И.[1], Волосников Д.В.[1], Губин А.А.[1, 2], Старостин А.А.[1], Шангин В.В.[1], Антонов Д.В.[3]

[1] Институт теплофизики УрО РАН,
620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 107а
[2] Уральский федеральный университет имени Б.Н. Ельцина,
620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19
[3] Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, Россия, Томск, ул. Ленина, 30

Применение водо-топливных эмульсий способствует минимизации расхода топлива, повышению динамики процесса его горения и полноты выгорания, снижению вредных выбросов при сжигании топлива [1]. Системы первичного распыления жидкостей позволяют получить размеры капель, как правило, недостаточные для их полного испарения в рамках одного технологического цикла. Требуется доизмельчение в объеме камер сгорания, реакторах, смесительных установках и др. К числу перспективных технологий вторичного доизмельчения капель относится технология, базирующаяся на микро-взрыве и паффинге [2]. Однако, такие режимы реализуются не сразу при достижении температуры насыщенных паров дисперсной фазы, а только после её значительного перегрева [3, 4]. Для исследования взрывного вскипания в уральской школе теплофизики традиционно применяется тонкая платиновая проволочка, погруженная в исследуемую жидкость и быстро разогреваемая импульсом тока [5]. В то же время, исследовательской группой из Томска применяются следующие методы высокотемпературного нагрева композитных капель: на массивной подложке, при контакте с разогретым стержнем (локальный нагрев), в потоке разогретого воздуха и в пламени спиртовой горелки [6, 7].

Целью работы является выяснение температурно-временных и концентрационных зависимостей вскипания эмульсии типа вода в масле при разных схемах её нагрева.

Рапсовое масло было выбрано нами в качестве базовой жидкости, так как рапс хорошо приспособлен к умеренному климату нашей страны и даёт хорошие урожаи [8]. В то же время биотоплива из рапсового масла имеют определенные недостатки, такие как: повышенная вязкость, высокая температура воспламенения, повышенная коксуемость. Применение таких биотоплив может повлечь снижение мощности двигателя и повышенный расход топлива [9]. Следовательно, необходимы исследования для повышения эффективности их использования для создания альтернативы традиционным видам топлив.

В качестве одного из методов исследования был применен метод управляемого импульсного нагрева проволочного зонда, погруженного в исследуемую жидкость, а именно, режим термостабилизации при достижении температурой зонда заданного значения T_{st} [10]. Суть данного режима состоит в создании кратковременных квази-изотермических условий для импульсно нагреваемого зонда диаметром 20 мкм в веществе при соответствующем регулировании мощности его нагрева $P(t)$. При нагреве температура зонда увеличивается от начального значения T_0 до выбранного значения $T_{st}(t_2 > t_1) \approx const$ за время порядка $t_1 \sim 10^{-4}$ с и в дальнейшем поддерживается постоянной на заданном интервале времени t_2.

Опыты проведены при атмосферном давлении. Значение температуры T_{st} варьировалось в диапазоне (100 ÷ 350) ºС. То есть, исследования проводились, как в области устойчивых состояний дисперсной фазы, так и в областях перегретых (относительно линии равновесия жидкость-пар) и неустойчивых (согласно данным для достижимого перегрева воды [11]) состояний. Концентрация воды в масле менялась в пределах (1.5 ÷ 10) об.%. Характерное время наступления конвекции для исследуемых эмульсий в заданных условиях опыта составляло более 100 мс.

В докладе представлены результаты осуществления режима взрывного вскипания дисперсной фазы, позволяющего интенсифицировать процесс теплообмена, с помощью взаимодополняющих схем нагрева, упомянутых выше.

Авторы выражают благодарность Елиной С.Ю. за помощь в подготовке опытов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-69-10006, https://rscf.ru/project/23-69-10006/

Список литературы:

1. Антонов Д.В., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Характеристики аэрозольного облака, образующегося при микровзрывном разрушении двухжидкостной капли // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. № 16. С. 14-17.
2. Antonov D.V., Piskunov M.V., Strizhak P.A.. Breakup and explosion of droplets of two immiscible fluids and emulsions // Int. J. Therm. Sci. 2019. V 242. P. 30-41.
3. Корягин В.А. Температурные условия микровзрыва капли водотопливной эмульсии // ТВТ. 1986. Т 24. № 5. С. 1033-1035.
4. Буланов Н.В., Гасанов Б.М. Зависимость начала цепной активации центров кипения от перегрева капелек дисперсной фазы эмульсии // ТВТ. 2011. Т. 49. № 2. С. 221-224.
5. Скрипов В.П., Павлов П.А. Взрывное вскипание жидкостей и флуктуационное зародышеобразование // ТВТ. 1970. Т. 8. № 4. С. 833-839.
6. Стрижак П.А., Накоряков В.Е., Волков Р.С., Кузнецов Г.В. Взрывной распад капель эмульсий на основе воды и нефтепродуктов в условиях высокотемпературной очистки жидкостей // ДАН. 2018. Т. 483. № 3. С. 272-277.
7. Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Razumov D.S., Fedorenko R.M., Yanovskiy L.S., Strizhak P.A. Puffing and micro-explosion effects in composite liquid fuels in different heating arrangements // Int. J. Heat Mass Transfer. 2024. V. 223. 125273.
8. Сивачев В.М., Маркова В.В., Марков В.А., Сивачев С.М. Оптимизация состава смесевых биотоплив для дизельных двигателей // Безопасность в техносфере. 2014. №. 6. С. 19-30.
9. Плотников С.А., Черемисинов П.Н. Недостатки применения топлив на основе рапсового масла в дизельных двигателях // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. №. 4. С. 97-101.
10. Волосников Д.В., Поволоцкий И.И., Старостин А.А., Скрипов П.В. Теплоотдача к водным растворам гликолей в импульсно перегретых состояниях // ТВТ. 2021. Т 59. №3. С. 283-291.
11. Skripov P.V., Bar-Kohany T., Antonov D.V., Strizhak P.A., Sazhin S.S. Approximations for the nucleation temperature of water // Int. J. Heat Mass Transfer. 2023. V. 207. 123970.

УДК 536.42

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ СЛОЯ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ НА МЕХАНИЗМ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО – И МАССОПЕРЕНОСА, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ ЕГО СУШКИ

Сыродой С.В., Нигай Н.А., Познахарев А.С.

Томский политехнический университет
630050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30

Древесная биомасса, как показывают последние исследования [1] в области развития альтернативной (нетрадиционной) энергетики, является наиболее перспективным и относительно дешевым возобновляемым энергоносителем, доступным практически во всех регионах планеты. Стоит обратить внимание на результаты экспериментальных исследований по итогам, которых [2] установлено, что в результате горения древесной биомассы практически не образуется оксидов азота (NO_x) и серы (SO_x).

Однако, стоит отметить, что даже у одной из самых теплотворных пород древесины – дуба, теплота сгорания $(Q_n^d)_{wood}$ = 11 МДж·кг$^{-1}$) ниже теплотворной способности самого низкосортного угля (бурого) $(Q_n^d)_{lign}$ =13 МДж·кг$^{-1}$ [3]. Соответственно, энергоэффективность котельного агрегата, сжигающего древесину ниже, чем у котла, работающего на угле [4]. Эффективность использования биомассы в энергетике можно повысить за счет разработки новых технологий подготовки и сжигания древесной биомассы в топочных устройствах котельных агрегатов или ее пирогенетической переработки в другие продукты [5].

Цель данной работы – установление по результатам экспериментов степени влияния толщины слоя древесной биомассы на характеристики протекания процессов сушки.

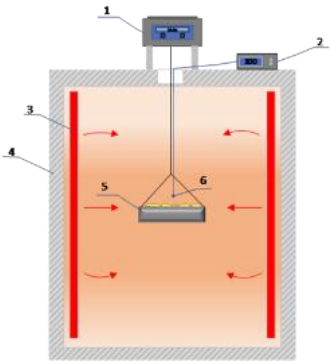


Рис. 1. Экспериментальный стенд: 1 – лабораторные весы ACZET (CITIZEN) CY-1003; 2 – терморегулятор ТРМ 500; 3 – электрический нагреватель; 4 – сушильная камера СНОЛ-3.5-М2У42; 5 – поддон с навеской древесной биомассы, у которого изменялась высота в ходе эксперимента; 6 – термоэлектрический преобразователь.

Эксперименты проведены на установке, представленной на рисунке 1. Последняя состоит из сушильной камеры СНОЛ-3.5-М2У42 (максимальная температура нагрева T_{max}=423 К; скорость нагрева 10 K/s), регистратора температуры внутрикамерного пространства (хромель-алюмелевой термопарой (ТХА), погрешность измерения T_g 0,1 С) и высокоточных лабораторных весов ACZET (CITIZEN) CY-1003 (погрешность измерения массы 0,001 г).

Навеска древесной биомассы через подвесное соединение крепилась к электронным весам (рис. 1). Поддон с опилками размещался в центральной части сушильной камеры. С целью измерения температуры в середине глубины поддона устанавливалась хромель-алюмелевая термопара (толщина проволоки 0.1 мм, диаметр спая 0.25 мм, время задержки измерений τ_{del}=0.3 с, погрешность измерения температуры ±1.5 К).

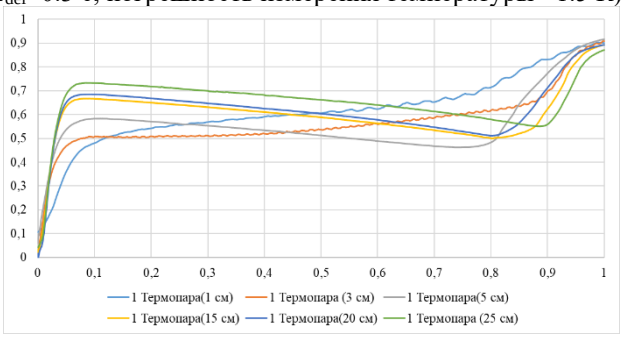


Рис. 2. Зависимость температуры в середине толщины древесной биомассы от времени при разных толщинах слоя древесной биомассы в безразмерном виде при температурном режиме 373 К.

По рисунку 2 можно сказать, что увеличение толщины диспергированной древесины приводит к деформации температурного поля и соответственно к изменению механизма тепло – и массопереноса внутри этого слоя.

Исследование выполнено за счет грантов РНФ (проект № 23-79-10092)

Список литературы:

1. Maxon L. Chitawo, Annie F.A. Chimphango, Steve Peterson (2018) Modelling sustainability of primary forest residues-based bioenergy system. Biomass and Bioenergy 108: 90-100.
2. S. Fogarasi, Calin-Cristian Cormos, Technico-economic assessment of coal and sawdust co-firing power generation with CO2 capture, Journal of Cleaner Production. 103 (2015) 140-148.
3. Mirkowski, Z.; Jelonek, I. Petrographic composition of coals and products of coal combustion from the selected combined heat and power plants (CHP) and heating plants in Upper Silesia, Poland. International Journal of Coal Geology, 2019, 201, 102-108.
4. R. Saidur, E.A. Abdelaziz, A. Demirbas, M.S. Hossain, S. Mekhilef, A review on biomass as a fuel for boilers, Renew. Sustain. Energy Rev. 15 (2011) 2262-2289.
5. Jie Liang, Guangcun Shan, Yifei Sun. Catalytic fast pyrolysis of lignocellulosic biomass: Critical role of zeolite catalysts. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 139 (2021) 110707.

УДК 536.24

ВЛИЯНИЕ НАЛИЧИЯ ТОНКОГО ПОРИСТОГО ПОКРЫТИЯ НА НАГРЕВАТЕЛЕ НА КРИТИЧЕСКИЙ ТЕПЛОВОЙ ПОТОК В ПЛОСКИХ МИКРОКАНАЛАХ С ИНТЕНСИВНЫМ ЛОКАЛИЗОВАННЫМ НАГРЕВОМ

Пуховой М.В., Зайцев Д.В.

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

Кипение хорошо изучено в простых случаях для больших объемов жидкости [1]. Проточное кипение в каналах и мини- каналах активно изучается [2-3]. Однако исследование проточного кипения в микро-каналах связано с новыми задачами существенно более интенсивного охлаждения электронного и микроэлектронного оборудования при возникновении неоднородного нагрева по плоскости канала [4].

В работе выполнены систематические исследования динамики пузырей и теплообмена при кипении с неоднородным нагревом (ширина потока рабочей жидкости больше ширины нагревателя) в мини- и микроканалах высотой от 0,2 до 3,7 мм при различном недогреве воды. Эксперименты проводились на нагревателе 3*3 мм^2 при ширине канала 30 мм. Эксперименты выполнены при интенсивном нагреве со стороны стенки вплоть до 1,6 кВт/см^2. Проведено сравнение кипения на гладком и шероховатом нагревателях, выполненных из меди. Пористую поверхность нагревателя формировали нанесением никелевого порошка (размер порошинок масштаба 50 мкм) на медное основание с дальнейшим спеканием разрядом элекрического тока. Сформованное никелевое покрытие имело толщину 40-100 мкм. Примеры растрового изображения покрытия электронным микроскопом представлен на Рис. 1. Покрытие выдерживает несколько циклов нагрев-кипение-охлаждение без существенных изменений своих свойств с точки зрения теплообмена.

Влияние удельного массового расхода (массовой скорости) воды и поверхности нагревателя (указана в легенде) на критический тепловой поток q_{cr} для нагревателя 3x3 мм^2 представлены на Рис.2. Установлено, что пористый нагреватель позволяет увеличить съем тепла с поверхности нагревателя, причем тем больше, чем выше расход охлаждающей жидкости. Из представленного графика видно, что при больших значениях массового расхода воды критический тепловой поток возрастает примерно на 30% и достигает величины в более чем 0,9 кВт/см^2. Данное явление требует дальнейшего изучения.

В докладе будут представлены подробные результаты исследования кипения в каналах с неоднородным нагревом для воды. Так же будут представлены данные по визуализации процесса кипения и динамики пузырей с частотой съемки до 775 000 кадров в секунду.

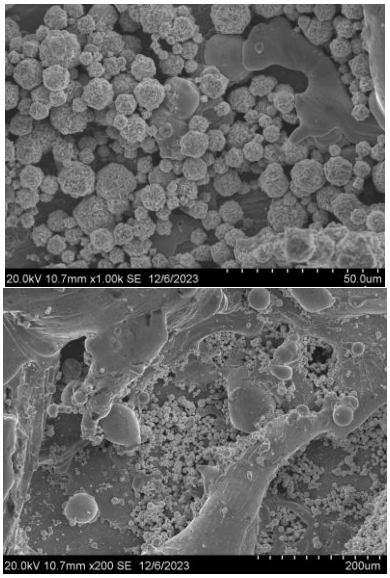


Рис. 1. Примеры растрового изображения покрытия электронным микроскопом.

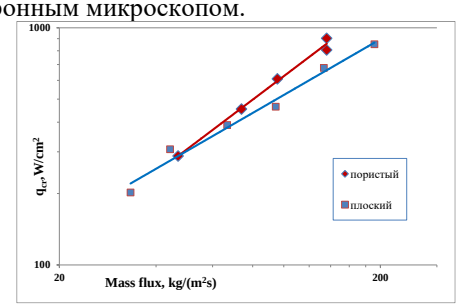


Рис. 2. Влияние удельного массового расхода (массовой скорости) воды и поверхности нагревателя (указана в легенде) на критический тепловой поток q_{cr} для нагревателя 3x3 мм^2 (ширина канала 30 мм, высота 1,3 мм).

Список литературы:

1. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. М. Атомиздат, 1979, 416 с.
2. Liang G., Mudawar I. Review of channel flow boiling enhancement by surface modification, and instability suppression schemes //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2020. – Т. 146. – С. 118864.
3. Pukhovoy M.V., Bykovskaya E.F., Kabov O.A. Experimental Achievements in Mini- and Micro- Channel Cooling. Journal of Physics: Conference Series to be published in 2022.
4. International Roadmap for Devices and Systems, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2021 // [Электронный ресурс] - https://irds.ieee.org/editions.

Работа поддержана Российским Научным Фондом (грант № 22-49-08018).

УДК 621.03

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ОТСЕКА НАГРЕВА СМЕШИВАЮЩЕГО ПОДОГРЕВАТЕЛЯ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Святкин Ф.А., Лычаков В.Д., Усов Ю.В., Матяш А.С., Балунов Б.Ф.

ОАО «НПО ЦКТИ»,
191167 Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Атаманская, д. 3/6

Реакторная установка (РУ) БРЕСТ-ОД-300 работает на быстрых нейтронах и имеет свинцовый теплоноситель первого контура. Основным принципом данной РУ является естественная безопасность. Данный принцип основан на последовательном отказе от любых технических решений, потенциально опасных проектными и запроектными авариями и организации безопасности за счёт использования природных законов и свойств используемых материалов, что позволит достичь убедительно прогнозируемой безопасности.

Однако, свинцовый теплоноситель накладывает на второй контур ограничение – температура питательной воды, поступающей из системы регенерации высокого давления в парогенератор должна быть не ниже 340°С во всех эксплуатационных режимах, в связи с опасностью затвердевания свинца.

В связи с этим в схему регенеративного подогрева питательной воды включён смешивающий подогреватель питательной воды (СППВ), который обеспечивает нагрев питательной воды до требуемого значения в процессе контактного теплообмена с греющей средой – паром, поступающим из парогенератора. Питательная вода поступает в СППВ после последнего по её ходу поверхностного подогревателя – ПВД-8. СППВ работает при давлении 14,6 МПа.

Интенсивность процесса контактного теплообмена воды и водяного пара хорошо изучена в области давлений не более 1,4 МПа. Разработаны соответствующие расчётные рекомендации для смешивающих подогревателей низкого давления и деаэраторов питательной воды [1-2]. Две экспериментальные работы по контактному пароводяному теплообмену при давлении пара P=15,0 МПа и температуре воды T=300-340 °C были проведены ОАО «ВТИ» в 2014 г, в процессе контакта пара с водой, вытекающей под давлением из одиночного соплового отверстия диаметром 10 или 20 мм, а еще одна на стенде высокого давления ОАО «ВТИ» с участием сотрудников ОАО «НПО ЦКТИ».

Дополнительно было принято решение о проведении экспериментальных исследований процесса теплообмена на полновысотной крупномасштабной модели узла смешения потоков теплообменивающихся сред при их натурных параметрах (давление, температура, скорость истечения из отверстий) в СППВ для РУ БРЕСТ-ОД-300 в различных режимах её работы.

При создании модели СППВ были сохранены натурные высоты теплообменного аппарата и отдельных элементов СППВ, диаметры и шаги расположения отверстий в тарелках. Количество отверстий в тарелках и проходные сечения, а также расходы теплообменивающихся сред были выполнены в масштабе моделирования 1:245.

Испытания модели СППВ были проведены как с одной тарелкой, так и с двумя, при этом расположение второй тарелки сохранялось таким же, как и в опытах с одной тарелкой. Тарелка была выполнена в виде перфорированного листа и выполняла функцию равномерного распределения падающих капель и струй нагреваемой воды [3].

Исходя из условий работы СППВ, можно полагать, что для описания теплогидравлических процессов в аппарате можно использовать капельную модель, в которой выходящие из отверстий тарелок струи “наталкиваются” на паровую среду высокой плотности и разбиваются на капли. При этом скорость капель уменьшается до скорости свободного падения капли воды плотностью не менее ρ' в паровой среде плотностью ρ'' [3].

Выводы

1. На основе результатов экспериментального исследования модели СППВ конструкции ЦКТИ показано, что температуры питательной воды на выходе из СППВ составит не менее 341 °С во всех проектных режимах его эксплуатации.
2. Недогрев воды в СППВ с двумя тарелками и высотой отсеков нагрева не менее 0,7 м лежит в пределах 0,1–1,0 °С.
3. Использование капельной модели предпочтительно для теплового расчета отсека нагрева СППВ.

Список литературы:

1. РТМ 108.038.03-83. Подогреватели регенеративные смешивающие и схемы их включения. Расчет, проектирование и эксплуатация. Л.: НПО ЦКТИ, 1983.
2. РТМ 108.030.21-78. Расчет и проектирование термических деаэраторов. Л.: НПО ЦКТИ, 1979.
3. Сухоруков Ю. Г. и др. Теплогидравлические испытания модели смешивающего подогревателя высокого давления// Теплоэнергетика. 2021. № 12. С. 1–8.

УДК 536.24

КИПЕНИЕ ЖИДКОСТИ В МИНИ КАНАЛЕ НА ГЛАДКОЙ, ШЕРОХОВАТОЙ И ПОРИСТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Семенов А.А.[1], Зайцев Д.В.[1]
[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Кипение — это один из самых эффективных и простых способов отвода большого количества тепла. Этот процесс хорошо изучен [1], и в настоящее время активно исследуется проточное кипение в каналах [2].

Изучение проточного кипения в микроканалах особенно актуально для охлаждения электронного и микроэлектронного оборудования. Специалисты полупроводниковой промышленности на международном уровне отмечают проблему охлаждения микроэлектронных устройств при высоких и сверхвысоких тепловых потоках с неравномерным выделением тепла [3].

Интегральный тепловой поток на чипе может превышать 100 Вт/см^2, а локальный тепловой поток в отдельных областях размером от 0,1 до 2 мм, так называемых «горячих точках» («hot spots»), может быть больше 1 кВт/см^2 и меняться как в пространстве, так и во времени.

Цель исследования — анализ динамики пузырей и теплообмена в процессе кипения в мини- и микроканалах на гладкой, шероховатой и пористой поверхности. Рассматривается случай неравномерного выделения тепла и различного недогрева рабочей жидкости.

Эксперименты проводились на рабочем участке, оснащённом нагревателем с размерами 10x10 мм^2 и тепловой мощностью 3,5 кВт.

Общий вид рабочего участка представлен на фотографии (см. рис. 1). Верхняя стенка канала выполнена из просветлённого стекла толщиной 15 мм, что позволяет наблюдать за гидродинамикой процесса кипения. Нижняя часть канала представляет собой пластину из нержавеющей стали, в которую впрессован медный стержень с головкой размером 1x1 см^2, который выполняет функцию нагревателя.

Для измерения теплового потока в медном стержне и тепловых потерь в стальную пластину используются 6 термопар диаметром 0,25 мм, установленных в нагревателе, и 9 термопар диаметром 0,5 мм, размещённых в стальной пластине.

Визуализация производилась с использованием высокоскоростной камеры FASTCAM SA 5. Скорость съемки в экспериментах достигала 775 000 кадров в секунду. Камера оборудована оптической системой высокого пространственного разрешения, в частности объективами Mitutoyo M PLAN APO x5 и x10, позволяющими достичь пространственного разрешения около 1 мкм на пиксель камеры.

В результате было установлено, что при относительно низких тепловых потоках удельная частота образования пузырей на шероховатой поверхности выше, чем на гладкой. Однако с увеличением теплового потока разница в частоте образования пузырей между шероховатой и гладкой поверхностями становится незначительной (см. рис. 2).

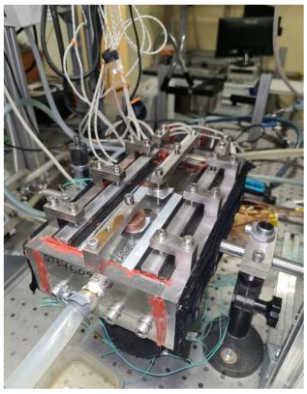


Рисунок 1. Фотография рабочего участка.

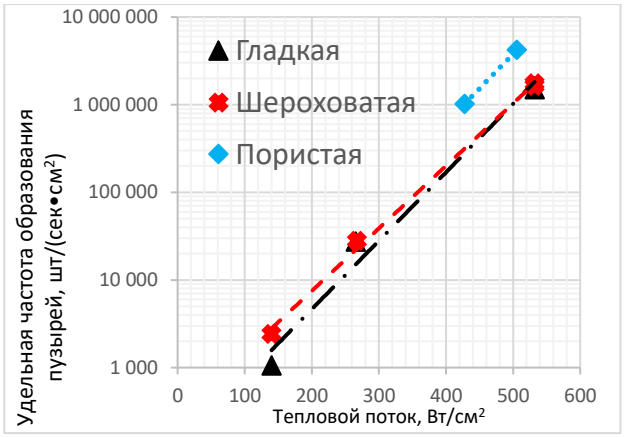


Рисунок 2. Удельная частота образования пузырей (образование новых пузырей за 1 секунду с 1 см^2 площади нагревателя) в зависимости от теплового потока.

При этом образование пузырей на пористой поверхности происходит с удвоенной частотой по сравнению как с гладкой, так и с шероховатой поверхностью во всём диапазоне тепловых потоков вплоть до 500 Вт/см^2 (рисунок 2).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-49-08018 https://rscf.ru/project/22-49-08018/)

Список литературы:

1. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. М. Атомиздат, 1979, 416 с.
2. Liang G., Mudawar I. Review of channel flow boiling enhancement by surface modification, and instability suppression schemes //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2020. – Т. 146. – С. 118864.
3. International Roadmap for Devices and Systems, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2021 // [Электронный ресурс] - https://irds.ieee.org/editions (дата обращения 01.03.2022).

УДК 536.248

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ СУХИХ ПЯТЕН ПРИ КИПЕНИИ ВОДЫ НА КРЕМНИЕВОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Стародубцева И.П.

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

Система охлаждения для серверов, хранящих терабайты информации, для мощных компьютеров и других гаджетов, чрезвычайно важна. Возникновение на охлаждаемой поверхности крупномасштабных расширяющихся сухих пятен резко ухудшает отвод тепла, что приводит к началу развития кризиса кипения, к перегреву, к перегоранию и разрушению нагревателя.

В работе [1] было проведено экспериментальное исследование развития кризисных явлений при кипении воды на тепловыделяющей поверхности из кремния. Размер пластины 20×20 мм. Высокоскоростная термографическая съёмка позволила изучить особенности развития областей с повышенной температурой, так называемых “сухих пятен”.

Знание закономерностей теплообмена, полного времени переходного процесса, скорости границы расширяющегося сухого пятна, необходимо для решения проблем надежности работы электронного оборудования.

В настоящей работе был проведен ряд вычислительных экспериментов, моделирующих динамику сухих пятен при кипении воды на высокотемпературной кремниевой пластине. Процесс описывается параболическим нестационарным дифференциальным уравнением теплопроводности со стоком тепла в охлаждающую среду. Вычислительная схема сконструирована на базе метода поперечных направлений [2].

Известно [3], что теплообмен в процессе динамической трансформации температурных возмущений значительно отличается от теплообмена в квази-стационарных условиях. Сток тепла q_- в охлаждающую среду был найден методом проб и ошибок с условием совпадения расчетной и наблюдаемой в эксперименте скорости перемещения границы сухого пятна. Анализ результатов позволил найти реалистичные значения стока тепла в охлаждающую среду. Максимальная плотность теплового потока, отводимого в охлаждающую среду, оказалась значительно выше критической плотности теплового потока в стационарном режиме. В вычислительных экспериментах получена динамическая картина расширяющегося сухого пятна, удовлетворительно коррелирующая с наблюдаемой в опытах, рис. 1. Начальное температурное возмущение моделировалось ступенькой, размер его соответствовал стартовому размеру пятна, наблюдаемого в эксперименте. Плотность теплового потока q_+=860 кВт/м^2. Достоверность полученных численно результатов подтверждена, таким образом, прямым сравнением с экспериментальными данными по скорости распространения границы сухого пятна.

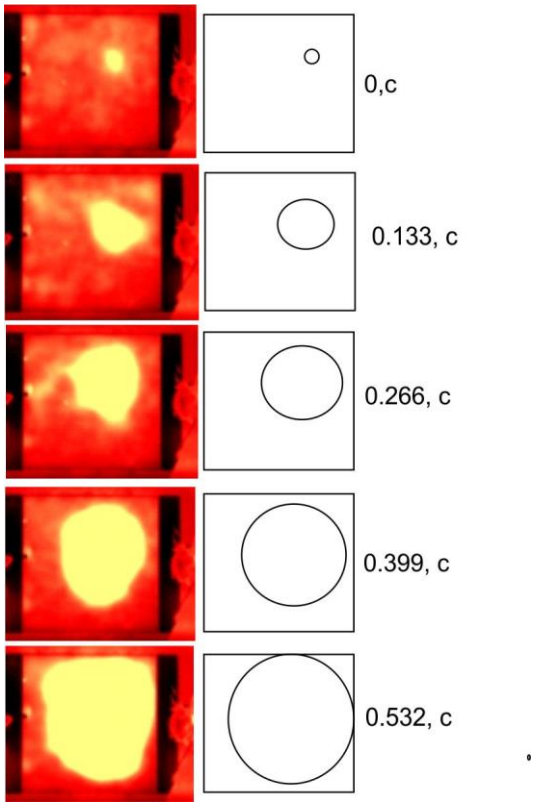


Рис. 1. Динамика расширяющегося сухого пятна. Данные высокоскоростной термографической съемки [1] в сравнении с результатами численного моделирования.
q_+=860 kW/m^2. Размер кремниевой пластины 20× 20 мм. Временной диапазон 0 - 0.532 с.

Результаты могут оказаться полезными и весьма перспективными для решения задач, связанных с термостабилизацией и повышением интенсивности двухфазного охлаждения высокомощного электронного оборудования.

Список литературы:

1. V. Serdyukov, I. Vladyko, S. Starinskiy, A. Rodionov, Y. Shukhov, I. Malakhov, A. Safonov, A. Surtaev, Pool boiling performance on the textured hemi-wicking surfaces fabricated by nanosecond laser ablation// Applied Thermal Engineering. 2023. V. 228, 120472.
2. K. Fletcher, Numerical methods in fluid dynamics, 1, Berlin: Springer-Verlag, (1991).
3. Starodubtseva I.P., Pavlenko A.N., Surtaev A.S. Heat transfer during quenching of high temperature surface by the falling cryogenic liquid film // Int. Journal of Thermal Sciences. 2017. V. 114. P. 196-204.

УДК 536.248.2

ТЕПЛООБМЕН И РАЗВИТИЕ КРИЗИСНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ СПРЕЙНОМ ОХЛАЖДЕНИИ: ИССЛЕДОВАНИЕ, ОПТИМИЗАЦИЯ И МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ

Суртаев А.С.[1,2], Половников М.А.[1,2], Миськив Н.Б.[1,2], Павленко К.А. [2,3], Владыко И.В.[2]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1
[3] Новосибирский государственный технический университет,
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Растущие потребности в охлаждении в различных отраслях, включая электронику, аэрокосмическую отрасль, металлургию и биомедицину, подчеркивают важность развития новых эффективных технологий охлаждения. На сегодняшний день одними из наиболее эффективных методов являются методы двухфазного охлаждения, такие как мини/микроканальные системы, струйное и спрейное охлаждение. Среди них, спрейное охлаждение отличается меньшим расходом жидкости по сравнению со струйным, а также меньшими техническими требованиями по сравнению с микроканальными системами [1].

В данном докладе представлены результаты экспериментального исследования теплообмена и КТП при спрейном охлаждении с использованием форсунок различного типа. Также в работе будут рассмотрены новые методы управления теплообменом и кризисными явлениями за счёт изменения толщины горизонтального слоя жидкости.

Эксперименты проводились с использованием различных установок с вертикальной и горизонтальной ориентацией поверхности нагрева [2,3]. В экспериментах использовались различные типы однофазных и двухфазных форсунок с углом распыла в диапазоне 20-90°, расходом жидкости до 24 г/с и в широком диапазоне расстояний от форсунки до поверхности.

Результаты исследований показали, что для различных типов форсунок существует оптимальное расстояние от форсунки до поверхности, на котором наблюдается максимальная интегральная теплоотдача при спрейном охлаждении. Было показано, что это оптимальное расстояние значительно меньше, чем расстояние, при котором основание конуса факела распыла полностью покрывает нагретую область, что связано с достаточно высокой интенсивностью теплообмена в области тонкой пленки жидкости, образующейся за импактной зоной. В исследовании предложено расчётное соотношение для определения оптимального расстояния, при котором достигается максимальный коэффициент теплоотдачи для различных типов форсунок. В работе также предложена новая полуэмпирическая зависимость для расчёта теплообмена в режиме без кипения для однофазных форсунок, которая демонстрирует более высокую точность по сравнению с существующими корреляциями.

Продемонстрировано, что для максимизации критического теплового потока при спрейном охлаждении необходимо выбрать расстояние, при котором достигается минимум максимальной локальной температуры на теплоотдающей поверхности.

Более того, на основе анализа кадров ИК-термографии показано, что степень неравномерности температурного поля при распылительном охлаждении зависит не только от расстояния от форсунки до поверхности, параметров и структуры спрейного потока, но и от механизма теплопередачи. Выявлено, что развитие интенсивного кипения в жидкой пленке приводит к изменению наклона кривой теплообмена, а также значительно снижает степень неравномерности охлаждения. В исследовании были достигнуты рекордные значения КТП 13,2 МВт/м² и 10,2 МВт/м² для однофазной форсунки (Q = 24,2 мл/с, L = 13 мм) и двухфазной форсунки (Q = 6,6 мл/с, L = 36 мм) соответственно. Несмотря на то, что КТП для пневматической форсунки на 22,7% ниже, чем у однофазной форсунки, он был достигнут при расходе жидкости в 3,7 раза меньшем. Использование высокоскоростной инфракрасной термографии позволило зафиксировать развитие кризисных явлений при спрейном охлаждении с использованием различных типов форсунок, в результате чего было показано, что незамываемые сухие пятна образуются преимущественно в областях с максимальной локальной температурой.

В заключительной части доклада будут представлены последние результаты по управлению картиной орошения, локальными и интегральными характеристиками теплообмена, а также механизмами формирования сухих пятен и критическими тепловыми потоками при варьировании толщины горизонтального слоя жидкости, которые были получены с использованием современных высокоскоростных методов, включая ИК-термографию и видеосъёмки, а также специальной конструкции рабочего участка с прозрачным нагревателем и возможностью изменения толщины горизонтального слоя жидкости над поверхностью тепловыделения.

Список литературы:

1. Zhang T. et al. Advanced Study of Spray Cooling: From Theories to Applications// Energies. 2022. V.15 №. 23. P. 9219
2. Surtaev A. et al. Exploring Heat Transfer Efficiency in Non-boiling Spray Cooling // International Journal of Thermofluids. 2023. Vol. 20. P. 100504.
3. Vladyko I. et al. Heat Transfer Peculiarities and Crisis Phenomena Development in Spray Cooling Using Various Types of Nozzles // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2024 (in press)

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-19-00581)

УДК 544.015.4

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ УДАРА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ И УСЛОВИЯ ИСПАРЕНИЯ КАПЛИ ВОДЫ С ТЕКСТУРИРОВАННОЙ ПОДЛОЖКИ

Сыродой С.В., Тамашевич М.С.

Томский политехнический университет
630050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30

Анализ развития современных высокопроизводительных электронных устройств показал, что мощность и быстродействие процессоров ЭВМ растут по экспоненциальному закону. При этом архитектура процессоров в таких системах стремится к компактности. Последнее приводит к увеличению удельной теплоемкости элементов электронных устройств [1].

Одним из перспективных решений для преодоления основных проблем, связанных с отводом большого теплового потока для высокопроизводительных электронных устройств, является технология капельного охлаждения, т.е. распылительное охлаждение [2].

Темой, представляющей интерес в процессе распылительного охлаждения, является взаимодействие капель с нагретыми твердыми поверхностями [3]. Однако не существует всеобъемлющей теории, описывающей и предсказывающей характеристики капли после столкновения с текстурированной поверхностью.

Целью работы данной работы является экспериментальное установление влияния скорости удара на характеристики и условия испарения капель воды с текстурированной подложки.

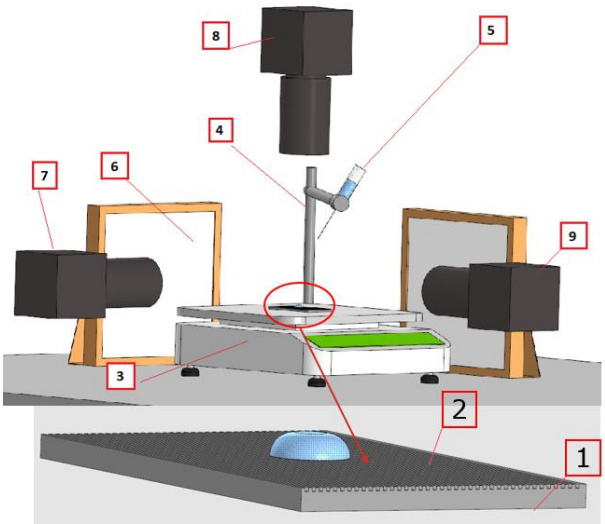


Рис. 1. Экспериментальный стенд: 1 – металлическая текстурированная подложка, 2 – капля воды, 3- нагревательная плита, 4 - штатив, 5 – шприц с водой, 6 – прожектора, 7 – камера с видом поперек канавок, 8 – камера с видом сверху, 9 – камера с видом вдоль канавок.

Для определения времени испарения капель жидкостей, падающих на текстурированную металлическую подложку, использовался экспериментальный стенд (рисунок 1). Капли дистиллированной воды сбрасывались на поверхность подложки с помощью инфузионного шприцевого насоса. Капля выдавливалась через тонкую иглу. Расстояние между концом иглы шприца и поверхностью подложки варьировалось от 10 до 40 мм. Этим высотам соответствуют скорости удара: 10мм – v=0.44, 20мм – v=0.63, 30мм =0,77, 40мм – v=0.88 м/с. Металлическая подложка крепилась на нагревательную плитку. Температура подложки варьировалась от 333 К до 373 К. Видеорегистрация процесса растекания и испарения капель воды по поверхности подложки осуществлялась с помощью высокоскоростных видеокамер с частотой съемки 1000 кадров в секунду.

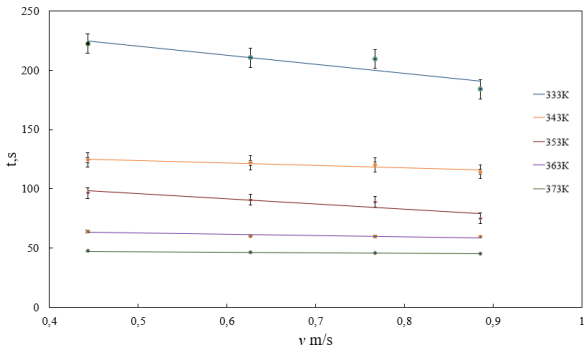


Рис. 2. Зависимость времени испарения капли воды от скорости столкновения последней с подложкой

На рисунке 2 приведены зависимости времени испарения капли от скорости её соприкосновения с подложкой. Анализ рисунка позволяет сделать следующий вывод: скорость удара капли о подложку оказывает незначительное влияние на характеристики условия и её испарения при температуре нагревателя $T_h \geq 363$ К. В тоже время, в диапазоне температур нагревателя от 333 К до 353 К отмечено, что с ростом скорости соприкосновения капли с подложкой, время полного испарения капли уменьшается (на 22%). Это скорее всего обусловлено тем, что с ростом скорости удара капли о подложку растекаемость капли интенсифицируется. Соответственно, площадь контакта в системе «капля воды – металлическая подложка» также значительно возрастает.

Исследование выполнено за счет грантов РНФ (проект № 23-79-10092)

Список литературы:

1. J.-X. Wang, Y.-Z. Li, M.-L. Zhong, H.-S. Zhang, Investigation on a gas-atomized spray cooling upon flat and micro-structured surfaces, Int. J. Therm. Sci., 161 (2021).
2. Jan Breitenbach, Ilia V. Roisman, From drop impact physics to spray cooling models, Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2018.
3. T.A.H. Nguyen, A.V. Nguyen, M.A. Hampton, Z.P. Xu, L. Huang, V. Rudolph, Theoretical and experimental analysis of droplet evaporation on solid surfaces, Chem. Eng. Sci., 69 (2012), pp. 522-529

УДК536.24

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРЕВА И ИСПАРЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТЕЛА В ИНДУКТОРЕ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РАЗРАБОТКЕ КОСМИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ ИСПАРИТЕЛЬНОГО ТИПА

Виноградов Д.А.[1], Глазков В.В.[2], Ковешников К.С[1,3], Тепляков И.О.[1]

[1] Объединенный институт высоких температур РАН,
125412, Россия, Москва, Ижорская, 13 стр.2
[2] Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, Россия, Москва, Красноказарменная, 14
[3]Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН,
115191, Россия, Москва, ул. Большая Тульская, 52

С 1957 г., когда в СССР был запущен первый в мире искусственный спутник, проблемы, связанные с загрязнением орбиты Земли космическим мусором, беспокоят научное сообщество. С того момента количество объектов на орбите Земли сильно выросло и на 2021 год (только наблюдаемый объектов с Земли) составляет более 20 тысяч. С уверенностью можно сказать, что это число с каждым годом будут увеличиваться. Поскольку перемещение в космосе требует затрат рабочего тела на создание реактивной тяги, в настоящее время, это рабочее тело (топливо) приходится на орбиту доставлять с Земли, что требует колоссальных затрат [1-3]. Использование космического мусора же в качестве источника массы для создания тяги позволяет решить эту проблему.

В нашей конструкции, основная часть ракетного двигателя это индукционный испаритель металла. Фрагменты космического мусора помещаются в рабочую камеру, переменный ток высокой частоты в индукторе приводит к возникновению индуцированного тока в металлических фрагментах и их разогреву. Наличие вакуума обеспечивает интенсивное испарение и создание тяги.[4]

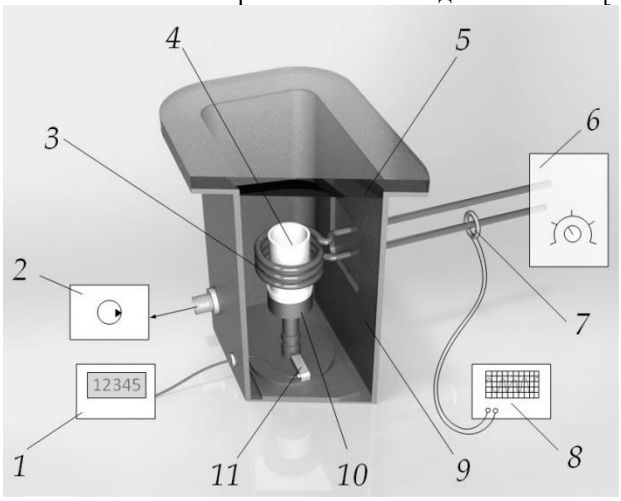


Рис. 1. *Схема экспериментальной установки. 1 – устройство вывода с ЖК-дисплеем; 2 – форвакуумный насос; 3 – индуктор; 4 – сопло; 5 – крышка камеры низкого давления; 6 – блок управления индуктором; 9 – трансформатор тока; 8 – осциллограф; 9 – камера низкого давления; 10 – стойка; 11 – тензодатчик.*

С целью экспериментального исследования данной концепции была разработана установка следующей конструкции (Рис. 1). Нагреваемое тело помещается в керамическое сопло имитирующее сопло космического двигателя. Сопло помещается в индуктор и устанавливается на подставку с тензодатчиком измеряющим вес. Вся конструкция была заключена в вакуумную камеру. При нагреве тела в индукторе до температуры кипения начинается интенсивное испарение и весы показывали увеличение веса, что можно трактовать как появившуюся реактивную тягу.

Использовалась индукционная установку со следующими параметрами – частота 30-60 кГц, ток в индукторе – до 800 А, мощность – до 15 кВт.

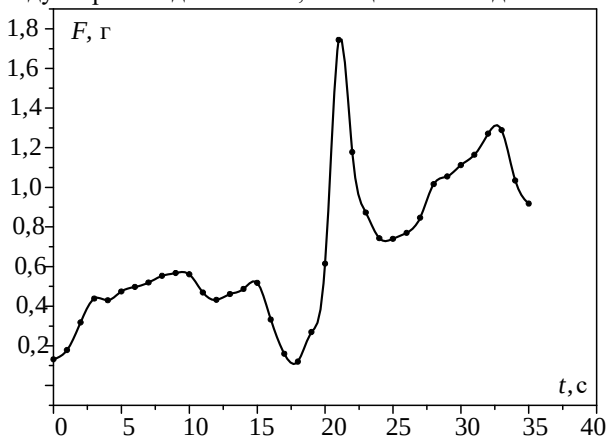


Рис.2 *Схема расчетной области. 1 – нагреваемое тело, 2 – кольца создающие магнитное поле.*

На Рис. 2 показан график зависимости создаваемой тяги от времени для кусочка цинка массой 7 г помещенного в сопло. Экспериментальные значения качественно совпадают с результатами ранее сделанных аналитических оценок. Возникновение пика в районе 20-22 с требует дополнительного уточнения, возможно, это связано с перераспределением цинка в сопле и увеличением влияния электромагнитной силы.

Работа поддержана грантом РНФ 23-29-00911.

Список литературы:

1. ESA’s Space Environment Report 2023. Available online: https://www.esa.int/Space_Safety/ESA_s_Space_Environment_Report_2023 (accessed on 10/08/2023).
2. Kessler, D.J.; Cour-Palais, B.G. Collision frequency of Artificial satellites: the creation of a debris belt.// J. Geophys. 1978, 83.
3. Morin J. Four steps to global management of space traffic // Nature. 2019, 567, p. 25-27.
4. Glazkov, V.V.; Sinkevich, O.A.; Shmelkov, G.B. Universal Rocket Space Engine and solving the problem of space debris // Journal of Physics: Conf. Series. 2019, 1370; 012036.

УДК 532.5

МОДЕЛИ МИКРО-ВЗРЫВНОГО РАСПАДА ДВУХЖИДКОСТНЫХ КАПЕЛЬ И ИХ ВНЕДРЕНИЕ В ANSYS FLUENT

Федоренко Р.М.[1], Антонов Д.В.[1], Стрижак П.А.[1], Сажин С.С.[1,2]

[1] Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30
[2] School of Architecture, Technology and Engineering, Advanced Engineering Centre, University of Brighton,
BN2 4GJ, United Kingdom, Brighton

Программный комплекс ANSYS Fluent хорошо зарекомендовал себя для решения фундаментальных и прикладных задач. Встроенные в ANSYS Fluent математические модели позволяют успешно решать разнообразные инженерные задачи, однако не всегда возможно применить встроенные подходы для моделирования новых физических эффектов и описания их закономерностей. ANSYS Fluent позволяет пользователям модернизировать встроенные модели с помощью User-Defined Functions (UDF). Данный способ хорошо известен и может использоваться для внедрения новых моделей.

Эффекты микро-взрывного распада многокомпонентных капель являются основой перспективных технологий их вторичного измельчения, которое направлено на решение задач стабилизации распыления топлива, повышения эффективности горения топливных композиций, снижения антропогенных выбросов и многих других [1]. Данные процессы реализуются в двухжидкостных каплях при их интенсивном нагреве и способствуют кратному увеличению площади поверхности испарения и химического реагирования жидкости, повышению эффективности горения топливных композиций, снижению антропогенных выбросов и многих других [2].

Полученные ранее аналитическое решение [3] уравнения теплопроводности было реализовано в адаптированной версии ANSYS Fluent с использованием (UDF). Модель нагрева и испарения двухжидкостной капли была интегрирована в ANSYS Fluent с помощью макроса DEFINE_DPM_HEAT_MASS. Теплофизические и физико-химические свойства компонентов вводились с помощью макроса DEFINE_DPM_PROPERTY. Обновление размеров и температуры двухжидкостной капли на каждом временном шаге осуществлялось с помощью макроса DEFINE_DPM_SCALAR_UPDATE. Интегралы и средние температуры внутри капель рассчитывались методом трапеции. При расчетах время задержки распада рассчитывалось как время достижения на границе раздела вода/горючая жидкость температуры нуклеации воды.

Результаты расчетов сравнивались с экспериментальными данными и результатами расчетов в программном комплексе MATLAB [4]. На рис. 1 представлены зависимости времен задержки распада капель вода/н-додекан при варьировании температуры газовой среды при постоянном начальном радиусе капель R_{d0} = 1 мм. Из рис. 1 видно, что с ростом температуры газовой среды времена задержки распада, полученные по результатам экспериментальных данных и по результатам математического моделирования, снижаются. Наблюдается хорошее соответствие между результатами экспериментов и математического моделирования. В большинстве случаев результаты математического моделирования лежат в пределах доверительных интервалов экспериментальных данных. Также времена задержки распада, прогнозируемые с использованием UDF, лежат ниже, чем результаты, полученные с использованием расчетов в MATLAB, максимальные отклонения между кривыми не превышают 0.5%.

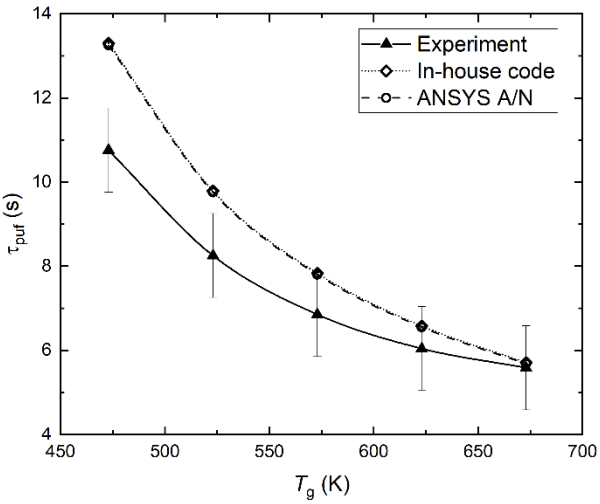


Рис. 1. Времена задержки микро-взрывного распада двухжидкостных капель вода/н-додекан при варьировании температуры газовой среды, начальный радиус капель 1 мм, концентрация горючего компонента 90 об%.

Список литературы:

1. Moussa O., Tarlet D., Massoli P., Bellettre J. Parametric study of the micro-explosion occurrence of W/O emulsions // Int. J. Therm. Sci. 2018. V. 133. P. 90–97.
2. Ithnin A.M., Noge H., Kadir H.A., Jazair W. An overview of utilizing water-in-diesel emulsion fuel in diesel engine and its potential research study // J. Energy Inst. 2014. V. 87. P. 273–288.
3. Sazhin S.S., Bar-Kohany T., Nissar Z., Antonov D., Strizhak P., Rybdylova O. A new approach to modelling micro-explosions in composite droplets // Int. J Heat Mass Transf. 2020. V. 161. 120238.
4. Antonov D.V., Strizhak P.A., Shchepakina E.A., Sobolev V.A., Sazhin S.S. combined analytical/numerical approach to the modelling of the processes leading to puffing and micro-explosion in a composite multi-component fuel/water droplet // At. Sprays. 2024. V. 34. P. 31–51.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 23-69-10006).

УДК 536.248.2

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КИПЕНИЯ НА ПОРИСТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Федосеев А.В.[1], Сальников М.В.[1]

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

В настоящее время пористые теплообменные поверхности, представляющие собой прочный теплопроводящий каркас, привлекают всё большее внимание исследователей и инженеров в области повышения теплопередачи при кипении [1]. Коэффициент теплоотдачи на пористом нагревателе может быть в три-шесть раз больше по сравнению с коэффициентами на гладкой поверхности [1], что можно объяснить большей площадью поверхности теплообмена с жидкостью и более сильным перемешиванием потоков. Разветвленная структуру пористого материала нагревателя обеспечивает множество активных центров нуклеации, однако, это также вызывает сопротивление перемещению паровой фазы от мест зародышеобразования к поверхности.

Поиск оптимальной конфигурации пористой поверхности с точки зрения интенсификации теплообмена на основе экспериментальных исследований является достаточно трудоемкой задачей. В последнее время для моделирования процессов кипения хорошо зарекомендовал себя метод решеточных уравнений Больцмана [2-4]. Например, в работах [2,3] исследовались процессы кипения на гладкой поверхности с контрастной смачиваемостью, а в работе [4] исследовалось влияние различных микроструктур на эффективность теплообмена при кипении.

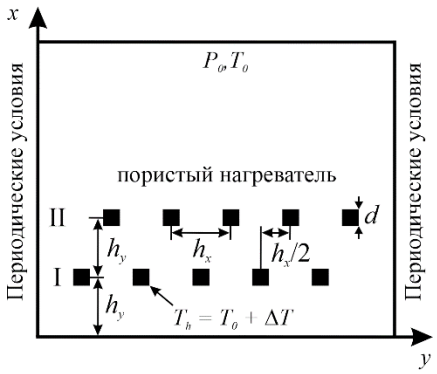


Рис. 1. Схема расчетной области и расположения прямоугольных элементов пористого нагревателя. d и T_h – размер и температура элементов, h_x и h_y – расстояние между ними по горизонтали и вертикали, I, II – номер ряда.

Целью данной работы является исследование процессов кипения на пористой поверхности и определение оптимальных параметров для интенсификации теплообмена с помощью метода решеточных уравнений Больцмана. В модели поверхность нагревателя задавалась в виде скелета прямоугольных металлических нагревателей, расположенных в нижней части расчетной области (Рис. 1). В работе варьировалось число таких нагревателей, их размер и расположение внутри пористой тепловыделяющей поверхности, их температура.

С помощью разработанной численной модели были проведены параметрические исследования процессов кипения на пористых нагревателях с различными параметрами пористого скелета и получены фазовые картины такого процесса (см. пример на Рис. 2). Показано, что коэффициент теплоотдачи на пористом нагревателе больше, чем на гладком нагревателе, зависит от числа элементов нагревателя и суммарной площади их поверхности. Существенным преимуществом таких нагревателей является значительно больший критический тепловой потока при больших тепловых перегревах.

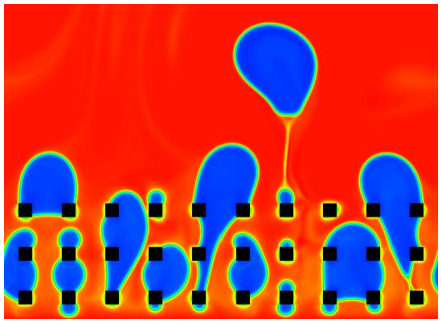


Рис. 2. Фазовая картина кипения на пористой поверхности. Черные квадратные области – элементы пористого нагревателя.

В работе представлены первичные данные по моделированию процесса кипения на пористых поверхностях методом решеточных уравнений Больцмана. В дальнейшем будут проведены расчеты для различных пространственных структур пористой теплообменной поверхности, на основе которых будут предложены оптимальные параметры для интенсификации теплообмена.

Список литературы:

1. Na M., Graham S. Pool boiling characteristics and critical heat flux mechanisms of microporous surfaces and enhancement through structural modification // Appl. Phys. Lett. 2017. V. 111, № 9, P. 091601.
2. Fedoseev A. V., et. al., Lattice Boltzmann Simulation of Optimal Biphilic Surface Configuration to Enhance Boiling Heat Transfer // Energies. 2022. V. 15. 21. P. 8204.
3. Федосеев А. В. и др. Моделирование динамики всплытия одиночного пузыря методом решёточных уравнений Больцмана // СибЖИМ. 2023. Т. 26, № 1. С. 191-200.
4. Fedoseev A., Salnikov M., Ostapchenko A. Modelling of pool boiling on the structured surfaces using Lattice Boltzmann method // E3S Web Conf. 2023. V. 459. P. 05003.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 24-29-00584).

УДК 621.9

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ В БОЛЬШОМ ОБЪЕМЕ НА МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Филиппов М.Д.[1], Дедов А.В.[1]
[1]Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Москва, Красноказарменная, 14

ВВЕДЕНИЕ

Теплообмен при кипении – один из важнейших процессов теплопередачи, на который оказывают влияние множество факторов, включая свойства поверхности, характеристики рабочей среды и условия окружающей среды. В современной научной и инженерной практике активно исследуются методы улучшения эффективности теплообмена при кипении, с целью повышения энергетической эффективности различных систем. В настоящей работе представлены результаты экспериментов по исследованию теплообмена при кипении насыщенной диэлектрической жидкости метокси-нонафторбутан (Novec 7100) в большом объеме на биметаллических поверхностях. Исследования выполнены для биметаллических образцов, а также для немодифицированных образцов из меди и нержавеющей стали 08Х18Н10Т в диапазоне давлений (1 – 4) атм.

2. ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБРАЗЦЫ

В работе были использованы следующие образцы полученные на кафедре ОФиЯС НИУ МЭИ: гладкие образцы из нержавеющей стали 08Х18Н10Т и меди; 4 биметаллических медных образца с различным количеством вставок из нержавеющей стали.

В медном образце делались прорези 1х1 мм, в которые заваривалась нержавеющая сталь с использованием установки лазерной сварки. Всего было сделано 6 (образец № 1), 7 (образец № 2), 10 (образец № 3) и 15 (образец №4) прорезей для каждого образца соответственно. В результате была получена поверхность с границами раздела материалов различной теплопроводности. Шаг между вставками из нержавеющей стали варьировался в диапазоне от 1 до 4 мм. Толщина образцов – 2,8 мм; диаметр образцов $d_{обр}$=3 см. После этого поверхность была обработана наждачной бумагой в результате чего ее можно считать технически гладкой. Измеренные показатели неровности (мкм): R_a = 2,5; R_c = 2,5 (R_a - среднее арифметическое отклонение профиля и R_c – средняя высота элементов профиля).

Чертежи образцов с 6 и 10 вставками представлены на рисунке 1.

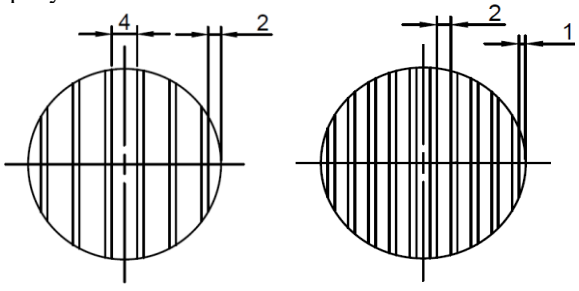


Рис. 1. Чертежи образцов: (а) – образец с 6 вставками; (б) – образец с 10 вставками.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В результате сравнения критических тепловых потоков (КТП), полученных на биметаллических поверхностях с экспериментальными данными на поверхностях без модификации, было выявлено повышение значений КТП. Можно сделать вывод, что использование биметаллических поверхностей повышает КТП, наибольшая интенсификация наблюдается на образце №4. Увеличение КТП составило в среднем 51% по сравнению с поверхностью из нержавеющей стали. Сравнение с медной поверхностью дало максимальное увеличение на 26 % при давлении в 1 атм.

Образцы №1 и №2 показывают почти идентичный уровень повышения КТП. Сравнение с медной поверхностью без модификации дало максимальное увеличение на 17 % при давлении в 1 атм. Увеличение относительно поверхности из нержавеющей стали составило в среднем 47%. Характерной особенностью сравнения КТП, полученных при разных давлениях, является уменьшающаяся интенсификация с ростом давления. Так, для образца №3, относительно поверхности из меди интенсификация уменьшается от 19% до 10 % при давлениях 1 и 4 атм соответственно.

На рисунке 2 представлен график КТП всех образцов.

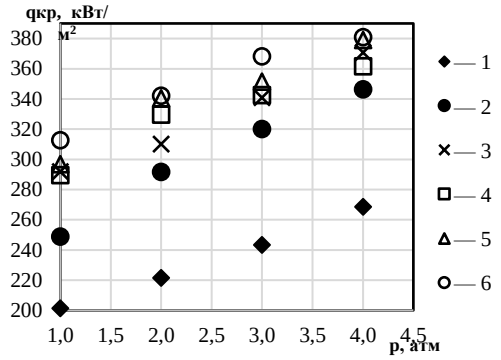


Рис. 2. Зависимость критического теплового потока qкр от давления p для всех образцов:1 – нержавеющая сталь без модификации; 2 – медь без модификации; 3 – Образец № 1; 4 – Образец № 2; 5 – Образец № 3; 6 – Образец № 4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований теплообмена при кипении насыщенной диэлектрической жидкости Novec 7100 на биметаллических образцах, а также для образцов из меди и нержавеющей стали в диапазоне давлений (1 – 4) атм.

Выявлено влияние шага расположения вставок и давления на относительное увеличение КТП.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 24-19-00403.

УДК 536.715

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИСПАРЕНИЯ КАРБИДА ТАНТАЛА-ЦИРКОНИЯ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ СВЫШЕ 4000 К.

Фролов А.М.[1], Петухов С.В.[1], Булава А.С.[1,2]

[1] Объединенный институт высоких температур РАН,
125412, Москва, улица Ижорская, дом 13, строение 2

[2] Московский физико-технический институт (НИУ),
141701, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9

Смешанная карбидная система TaC-ZrC относится к сверхтугоплавким керамикам (UHTCs- ultra-high temperature ceramics) - классу соединений с температурами плавления свыше 3500 К. Благодаря своей способности выдерживать экстремальные тепловые нагрузки и ряду других свойств эти соединения рассматриваются как перспективные для использования в элементах ядерной и ракетной техники. Однако, их применение ограниченно недостатком данных об их теплофизических свойствах: температурах плавления, теплопроводности и т.д. В частности, к настоящему моменту в литературе не представлено данных об испарении смешанных карбидов в окрестности их точек плавления, то есть при температурах около 4000 К.

В настоящей работе впервые представлены первые результаты исследования молекулярного состава пара смешанного карбида TaC-ZrC при температурах свыше 4000 К. Анализ состава пара выполнялся методом лазерно-индуцированного испарения, который был ранее успешно использован для исследования испарения графита до 4500 К[2] и систем Zr-O и Zr-Fe-O до 3300 К[3].

Для исследования испарения был выбраны четыре состава смешанного карбида xTaC-(1-x)ZrC, где x = 0,5, 0,75, 0,85 и 0,95. Образцы изготавливались методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза из порошков тантала, циркония и ацетиленовой сажи. Для гомогенизации состава приповерхностного слоя дополнительно выполнялся переплав участка поверхности образцов серией лазерных импульсов. В процессе переплава с помощью спектропирометра определялась спектральная излучательная способность указанного карбида на длине волны 888 нм.

Анализ состава пара выполнялся в процессе нагрева образца лазерными импульсами миллисекундной длительности с плотностью мощности в пятне нагрева до $5*10^2$ кВт/см^2. При этом происходил плавный нагрев образцов карбида до максимальной температуры порядка 4550 – 4650 К, то есть в том числе исследовалось плавление жидкой фазы. Регистрация температуры в центре области нагрева производилась с помощью специально сконструированного яркостного пирометра (быстродействие <1 мкс, эффективная длина волны 888 нм). Анализ полного молекулярного состава пара, эмитируемого горячей поверхностью, производился с применением времяпролетного масс-спектрометра. Поскольку регистрация температуры и полных масс-спектров пара производилась одновременно, в каждом отдельном эксперименте удавалось проследить эволюцию полного молекулярного состава пара в зависимости от условий эксперимента (температура, темп нагрева и т.д.)

Основными обнаруженными компонентами пара являются атомы и молекулы характерные для испарения индивидуальных карбидов ZrC и TaC: C_1-C_3, ZrC_2, Ta и Zr. Было обнаружено, что величины относительных парциальных давлений основных компонентов пара (C_1, Zr, Ta, ZrC_2) зависят только от температуры, а не от темпа нагрева-охлаждения поверхности. Из этого факта можно заключить, что в ходе цикла нагрева-охлаждения образца не происходило заметного изменения состава приповерхностного слоя образца.

Из данных об интенсивностях линий в масс-спектрах, были рассчитаны соотношения давлений или концентраций основных компонентов пара. Показано, что на молекулы C_2 и C_3 приходится около значительная часть атомов углерода, содержащегося в парах исследуемого карбида циркония-тантала. Обнаружено, что соотношение атомов тантала и циркония в паре не зависит от температуры в исследуемом диапазоне 4250 – 4550 К и определяется только соотношением этих металлов в конденсированной фазе. То же можно сказать и про соотношение количества атомов углерода и металлов (циркония и тантала) в паре: в пределах погрешности измерений не удалось обнаружить изменения этого соотношения с ростом температуры.

Список литературы:

1. Испарение карбидов / Е.К. Казенас, Ю.В. Цветков.; М.: URSS 2018. 800 с.
2. Frolov A.M. Sheindlin M.A. Mass spectrometric study of the laser-produced carbon vapor up to 4500 K // Carbon. 2022. V. 196. P. 474-482.
3. Sheindlin M. et. al. Mass spectrometric study of the laser-evaporated Fe–Zr–O system up to 3300 K // J. Am. Ceram. Soc. 2022. V. 105, N. 3 P. 2161-2170.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01139, https://rscf.ru/project/23-79-01139/

УДК 536.423.1

ОСОБЕННОСТИ НЕСТАЦИОНАРНОГО КИПЕНИЯ НЕДОГРЕТОЙ ВОДЫ НА МОДИФИЦИРОВАННОЙ ЛАЗЕРОМ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Хан П.В.[1,2], Левин А.А.[1,2], Москвин М. К.[3], Сафаров А.С.[1,2], Филатов И.А.[3]

[1] Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1
[2] Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 130
[3]Университет ИТМО,
197101, Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А.

Шероховатость поверхности, а также присутствие искусственно нанесенного микрорельефа могут существенно влиять на характеристики пузырькового кипения, и, как следствие, на коэффициент теплоотдачи и критический тепловой поток [1-2].

Целью данной работы является определение отличий характеристик кипения на гладкой поверхности с технической шероховатостью не более 5 мкм (см. рис. 1) и на модифицированной поверхности (см. рис. 2).

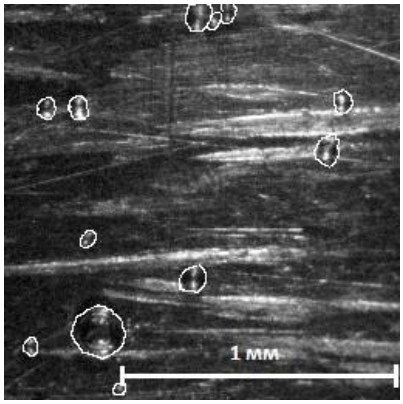


Рис. 1 Пузырьки на гладкой поверхности через 19,1 мс после начала нагрева.

Эксперименты осуществлялись на установке ЦКП «Высокотемпературный контур». Рабочий участок представляет собой вертикальный канал длиной 120 мм с квадратным сечением со стороной 18 мм, внутри которого расположен цилиндрический стальной нагреватель из стали марки 12Х18Н10Т с наружным диаметром 12 мм и толщиной стенки 1 мм. В канал снизу подаётся вода при давлении 0,29 МПа с начальной температурой на 53К ниже температуры насыщения, и средней скоростью 0,52 м/с. Появление и рост паровых пузырей на поверхности нагревателя фиксируется при помощи скоростной видеокамеры Phantom v2012 с частотой 180000 к/с с пространственным разрешением 5,5 мкм на пиксель и размером кадра 256×256 пикселей. Скорость роста температуры нагревателя составляла около 5000 К/с и контролировалась при помощи термопар. Лазерная обработка осуществлялась при помощи системы МиниМаркер-2 (ООО «Лазерный Центр») с волоконным наносекундным лазером (IPG-Photonics) длиной волны 1064 нм. Диаметр сфокусированного пучка составлял 50 мкм на уровне на уровне $1/e^2$. При помощи метода лазерно-эрозионной обработки были сформированы пины диаметром и высотой 200 мкм, расположенные в узлах прямоугольной сетки с шагом 400 мкм.

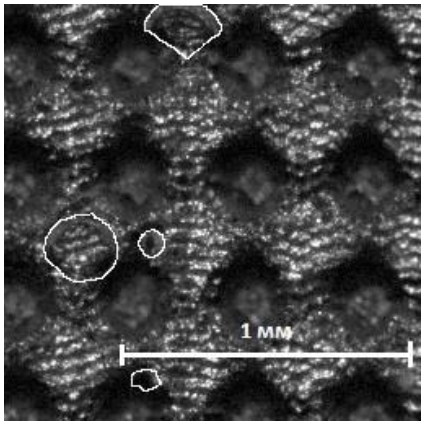


Рис. 2 Пузырьки на модифицированной поверхности через 22,2 мс после начала нагрева.

На основании 2 экспериментов на гладкой и 3 экспериментов на модифицированной поверхности, установлено, что на гладкой поверхности пузырьки появляются при температуре нагревателя 157-158 °С, а на модифицированной – при 163-173°С. Пузырьки располагаются между пинами и имеют в среднем более крупные размеры, чем на гладкой поверхности. Это связано с тем, что относительно точки нуклеации толщина перегретого слоя существенно больше для модифицированной поверхности. Резкое увеличение объема паровой фазы, сопровождающееся скачком давления, происходит для гладкой и модифицированной поверхности в диапазоне температур 195-220 °С, а покрытие паром около ½ поверхности при температуре 273-283 °С. Таким образом, влияние модификации поверхности отмечено в фазе пузырькового кипения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00092,
https://rscf.ru/project/22-19-00092/

Список литературы:

1. Hsu Y.Y. On the size range of active nucleation cavities on a heating surface // J. Heat Transfer. 1962. Vol. 84(3). P. 207–213.
2. Sarker D. et al. Single bubble dynamics during subcooled nucleate boiling on a vertical heater surface: An experimental analysis of the effects of surface characteristics // Int. J. Heat Mass Transf. 2017. Vol. 109.

УДК 536.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ТЕПЛОВОЙ ТРУБЕ С РАЗНЫМ РАЗМЕРОМ ПОР

Чевера В.В., Вожаков И.С., Лукьянов А.А.

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

Введение

Тепловые трубы являются эффективным устройством для передачи тепла [1]. Однако, несмотря на большие возможности, тепловые трубки и термосифоны не столь эффективны для новых требований современных технологий. В частности, серьезным ограничением является относительно низкая теплопередающая способность миниатюрных тепловых трубок и высокая чувствительность термосифонов к изменению положения в поле силы тяжести. К настоящему времени существует большое количество как стационарных, так и нестационарных моделей, описывающих теплофизические процессы в тепловых трубках [2]. Большинство этих моделей построены с использованием ряда допущений, которые неверны в реальных условиях эксплуатации. Одним из основных предположений является одномерность. Однако, учитывая небольшую длину тепловых трубок, разделенных на принципиально разные участки, на наш взгляд, необходимо учитывать изменение основных параметров как поперек потока, так и вдоль него. 2D-анализ потока не только поможет нам точнее оценить влияние капиллярных сил, но и позволит понять влияние смачиваемости на процессы внутри тепловых трубок.

В рамках работы было проведено исследование тепловой трубы с пористой структурой с различным размером пор. В качестве основных элементов используются звездочки (рис. 1а). Размер пор определялся сферой внутри двух соединенных звезд (рис. 1б).

а б

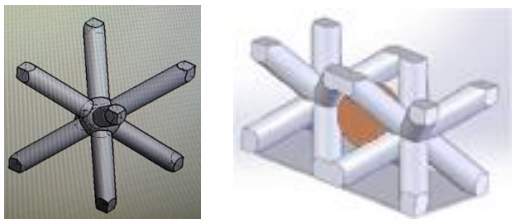


Рис. 1. Схема тепловой трубы с различным размером пористой структуры: а – звездообразная структура, б – сфера для измерения размеров пор.

2. Теоретическая модель

Для твердопористых цилиндров уравнение Навье-Стокса решалось методом VOF. Для этого задавались геометрия цилиндра, граничные условия, тип жидкости и скорость потока через цилиндр.

Далее моделировались процессы в тепловой трубке с пористым телом с различным диаметром пор. Расчет проводился в приближении модели Дарси:

$$u = -\frac{k}{\mu}\nabla p \qquad (1)$$

Здесь k – коэффициент проницаемости, μ – динамическая вязкость жидкости, ∇p – градиент давления в тепловой трубке. Коэффициент проницаемости пропорционален квадрату размера пор в пористом материале, а коэффициент пропорциональности зависит от геометрии:

$$k = Cr^2 \qquad (2)$$

В данной работе мы используем коэффициент, полученный в работе Джанга [3]:

$$C = \frac{1}{150}\frac{\varepsilon^2}{(1-\varepsilon)^2} \qquad (3)$$

Где ε пористость нашего объекта. Предполагается, что фитиль полностью заполнен жидкостью, имеющей плотность ρ и движущейся со скоростью u. Когда жидкость поступает в испаритель, она испаряется, поглощая тепло h_{lg} на единицу массы. Затем пар конденсируется в конденсаторе, а накопленное в нем тепло рассеивается. Таким образом, тепловой поток через тепловую трубку будет равен:

$$Q = \rho u h_{lg} S \qquad (4)$$

Где S площадь поперечного сечения канала.

Градиент давления в трубке считался линейным, а давление в конденсаторе и испарителе определялось давлением насыщения при заданных температурах и капиллярном давлении:

$$\nabla p = \frac{p_e - \left(p_c + \frac{2\sigma}{r}\right)}{L} \qquad (5)$$

Здесь $p_c = p_s(T_c)$ – давление насыщения в конденсаторе, p_e – давление насыщения в испарителе, σ– коэффициент поверхностного натяжения, r – радиус пор в фитиле, L – длина трубки. Таким образом, при заданных геометрических параметрах тепловой трубы перепад давления определяется разностью температур испарителя и конденсатора.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН (№ 122022800489-6).

[1] Chan CW, Siqueiros E, Ling-Chin J, Royapoor M, Roskilly AP. Heat utilization technologies: A critical review of heat pipes. Renew Sustainable Energy Reviews, 2015. 50: p. 615

[2] Lee JS., Rhi SH., Kim SK. Modeling and simulation of heat pipes: review. Journal of Mechanical Science and Technology, 2024. 38: p. 2591.

[3] J. Zhang, T. Ren, Y. Liang & Z. Wang. A review on numerical solutions to self-heating of coal stockpile: Mechanism, theoretical basis, and variable study. Fuel, 182, (2016), 80-109.

УДК 536.42

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КИПЕНИЯ В ТРЕХМЕРНЫХ МИКРОПОРАХ

Шебелев А.В.[1,2], Зайцев Д.В.[1] Кабов О.А.[1]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79

Исследование процесса кипения жидкости в микропорах является крайне актуальной и важной темой. Более полное понимание этого процесса поможет в интенсификации теплообмена в устройствах для охлаждения электронных компонентов, спутниковых систем, создании более совершенных теплообменных аппаратов с более компактными размерами и весом. Изучение кипения в микропорах представляет собой сложную задачу из-за большого количества физических явлений, влияющих на процесс.

VOF метод является одним из наиболее распространенных и эффективных численных методов для моделирования многофазных потоков, таких как кипение. Он позволяет довольно точно определить и отслеживать границы между фазами и учитывать их взаимодействие, что делает его подходящим для исследования кипения в микропорах, однако такой подход является численно затратным.

Для моделирования поверхностного натяжения в данной задаче используется CSF(непрерывная поверхностная сила) алгоритм, предполагающий введение в уравнения движения дополнительной объемной силы F_S, величина которой определяется из соотношения:

$$F_s = \sigma k \nabla F ,$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения, k – кривизна свободной поверхности, которая определяется как дивергенция вектора нормали:

$$k = \nabla\left(\frac{n}{|n|}\right).$$

Нормаль к свободной поверхности вычисляется, в свою очередь, как градиент объемной доли жидкой фазы в ячейке:

$$n = \nabla F .$$

Процесс массопереноса реализован с помощью модели Lee.

Более подробное описание методики расчета и ее тестирование описано в [1].

Далее, используя предложенную методику, были проведены расчеты в микропорах. Было проведено исследование влияния на коэффициент теплоотдачи материала пор, краевого угла смачивания, вида засыпки (упорядоченная или шахматная) и температуры нагревателя.

На рисунке 1 показана геометрическая модель пористой структуры для упорядоченной засыпки с подложкой и нагревателем.

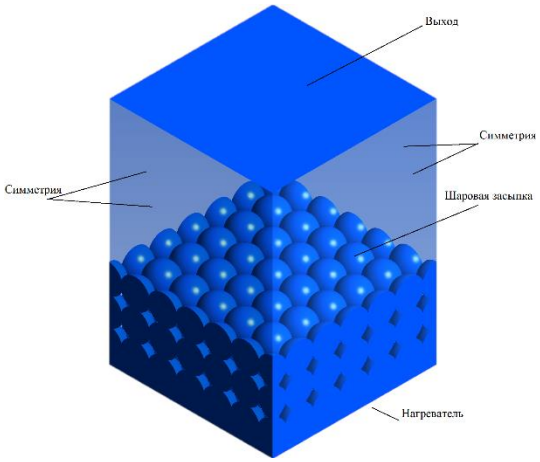


Рисунок 1 – геометрия расчетной области.

Расчеты проведены в трехмерной постановке. Расчетная область представляет из себя засыпку из шаров с диаметром 150 микрон, при этом они заходят друг в друга на 10 микрон, образуя тем самым периодическую пористую структуру. Рабочее тело – вода, с постоянными теплофизическими свойствами. На верхней границе расчетной области задавалось постоянное давление(P=0). На нагревателе задавалась постоянная температура. Материал подложки и пор варьировался, с соответствующими теплофизическими свойствами. На всех боковых стенках заданы условия симметрии. Краевой угол смачивания также варьировался. Построена полиэдральная сетка с минимальным шагом 3 микрона и общим количество ячеек 2,2 млн. В начальный момент времени область заполнена водой с температурой 370 К. Для корректного разрешения границы раздела вода-пар и численной стабильности расчета число Куранта было принято 1, CFL=1.

В результате расчетов получены распределения температур, фаз, коэффициента теплоотдачи и показан процесс образования пузырьков пара.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-49-08018.

Список литературы:

1. Shebelev A., Lobasov A.,Zaitsev D.,Kabov O., Numerical investigation of boiling process in micropores// E3S Web of Conferences. 2015. V. 459. 05009.
2. J. Lee, L.E O'Neill, I. Mudawar. 3-D computational investigation and experimental validation of effect of shear-lift on two-phase flow and heat transfer characteristics of highly subcooled flow boiling in vertical upflow // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. V. 150. 119291.

УДК 536.24

ОХЛАЖДЕНИЕ СТРУКТУРИРОВАННОЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДИСПЕРГИРОВАННЫМ ПОТОКОМ

В.С. Штелинг, А.Т. Комов, П.П. Щербаков, А.В. Захаренков, А.П. Слива

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

Быстрое развитие мощных электронных, энергетических установок и двигателей привело к тому, что характеристики этих систем стали ограничены возможностями теплосъема. [1] Не менее актуальным является вопрос охлаждения современных энергетических систем, в том числе перспективных термоядерных установок, где согласно оценкам также необходимо обеспечить теплосъем мегаваттных нагрузок. [2]

Термические нагрузки на современную и будущую электронику и объекты термоядерных реакторов настолько велики, что традиционное однофазное охлаждение конвекцией достигло своего предела. В этом случае необходимо применять охлаждение с фазовым переходом, при котором используется скрытая теплота испарения. [3]

Среди различных методов охлаждения с фазовым переходом именно охлаждение распылением имеет наилучшее сочетание эффективности теплосъема и однородности значений температуры. Рассматриваемый метод нашел широкое применение при охлаждении различных элементов силовой электроники [4,5].

Тем не менее, теплосъем и эффективность теплоотвода распылением нуждаются в дальнейшем улучшении, чтобы соответствовать требованиям приложений следующего поколения со сверхвысокой мощностью. Разработка свойств и структур поверхности, которая обеспечивается современными технологиями производства, может существенно повлиять на взаимодействие диспергированного потока и охлаждаемой стенки. Однако механизмы охлаждения распылением с улучшенными теплофизическими свойствами поверхности разнообразны и неоднозначны.

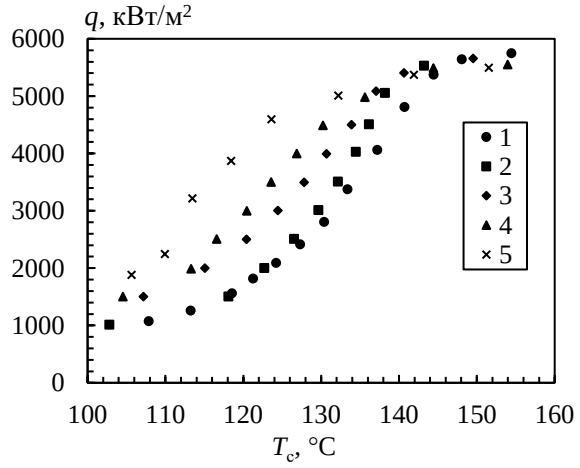


Рис. 1. Зависимость плотности теплового потока от температуры охлаждаемой стенки: 1 – не модифицированная поверхность, 2 – поверхность, модифицированная накаткой, 3 – поверхность, модифицированная лунками, 4 – поверхность обработанная электронным пучком, модификация 1, 5 – поверхность обработанная электронным пучком, модификация 2.

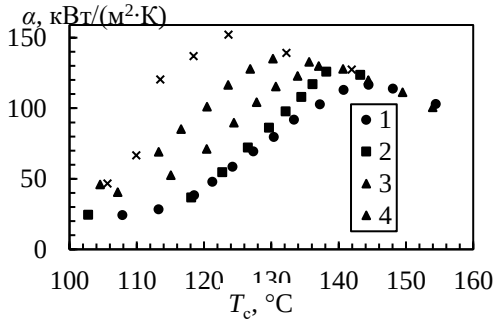


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры стенки

В данной работе было проведено исследование охлаждения различных структурированных поверхностей диспергированным потоком теплоносителя на экспериментальном стенде, моделирующем энергонагруженные элементы термоядерных установок. На рис. 1 и рис. 2 представлены графические зависимости для некоторых полученных экспериментальных результатов. Из представленных зависимостей можно увидеть, что модификация поверхности при диспергированном охлаждении увеличивает отводимую плотность теплового потока до 120% относительно не модифицированной поверхности при невысоком перегреве поверхности относительно температуры насыщения (примерно 25 °C). При этом критическая плотность теплового потока остается практически неизменной для различных типов поверхностей. Также наблюдается до 150% увеличения коэффициента теплоотдачи относительно не модифицированной поверхности при тех же значениях перегрева поверхности.

Список литературы:

1. Bar-Cohen, A. & Maurer, J.J. & Felbinger, J.G.. (2013). Darpa's intra/interchip enhanced cooling (icecool) program. 2013 International Conference on Compound Semiconductor Manufacturing Technology, CS MANTECH 2013. 171-174.
2. Vertkov, A. & Zharkov, M. & Lyublinski, I.E. & Berlov, A. & Tazhibayeva, I. & Ponkratov, Y. & Gordienko, Y. (2019). Новый вариант литиевого дивертора токамака КТМ. 42. 5-13. 10.21517/0202-3822-2019-42-4-5-13.
3. Liang, G. & Mudawar, I., Review of spray cooling – Part 1: Single-phase and nucleate boiling regimes, and critical heat flux. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. Vol. 115. pp. 1174-1205.
4. Hsieh, S. S., & Luo, S. Y., 2016, Droplet Impact Dynamics and Transient. Heat Transfer of a Micro Spray System for Power Electronics Devices. Int. J. Heat Mass Transfer, 92, pp. 190–205
5. Bloschock, K. & Bar-Cohen, A. (2012). Advanced thermal management technologies for defense electronics. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 8405. 16-. 10.1117/12.924349.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 23-19-00476

УДК 536.423

ВСКИПАНИЕ ПЕРЕГРЕТОЙ ВОДЫ, ИСТЕКАЮЩЕЙ ИЗ ДВУХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КАНАЛОВ

Шурупов В.А.[1,2], Бусов К.А.[1]

[1] Институт теплофизики УрО РАН,
620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 107а
[2] Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
630002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19

Актуальность изучения струй метастабильной (перегретой) [1] жидкости является важной задачей как для фундаментальных знаний (расширение имеющихся представлений в области физики кипения), так и для практических применений (совершенствование и разработка различных устройств для тонкодисперсного диспергирования) [2-4].

Целью данной работы являлось исследование динамики вскипания струй сильно перегретой воды, истекающих из двух цилиндрических каналов. При экспериментальном изучении наблюдалось изменение формы, угла раскрытия, дисперсности капельного состава и дальности распыливания струи при различных степенях перегрева жидкости.

Истечение вскипающей струи воды производилось из камеры высокого давления через два короткие цилиндрические каналы (диаметр d=0.3 мм) с острыми входными и выходными кромками, расстояние между центрами каналов равнялось 2.5 мм. Условия, при которых происходило истечение жидкости из камеры высокого давления (давление, температура) изменялись по линии фазового равновесия: T_s=390 – 570 К, p=0.1 – 8.6 МПа.

В ходе исследования было установлено, что с увеличением температуры рабочей жидкости происходило поэтапное изменение ее формы струи. В диапазоне температур T_s=390 – 440 К (рис. 1а) наблюдался стержневой вид у каждой из струй, как в случае истечения через один цилиндрический канал [4, 5]. При достижении температуры T_s=450 К (режим интенсивного испарения, рис. 1б) наблюдалось периодическое взаимодействие струй – происходило как слияние потоков, так и их раздельное течение. При температурах T_s=460 – 570 К (рис. 1в, интенсивное вскипание) струя принимала устойчивый пирамидальный вид на некотором расстоянии от канала.

а *б* *в*

Рис. 1. Форма струи вскипающей воды при различных температурах: а – T_s=420 К, б – T_s=440 К, в – T_s=530 К.

На рисунке 2 изображено изменение угла раскрытия вскипающей струи в зависимости от ориентации канала. Видно, что до температуры T_s=450 К у струи истекающей жидкости сохранялся неизменный нулевой угол раскрытия. С увеличением степени перегрева воды наблюдался рост, достижение локального максимума и дальнейшее уменьшение угла раскрытия. Наиболее заметное возрастание угла раскрытия было замечено в случае, когда прямая линия, соединяющая центры каналов, была ориентирована в горизонтальной плоскости.

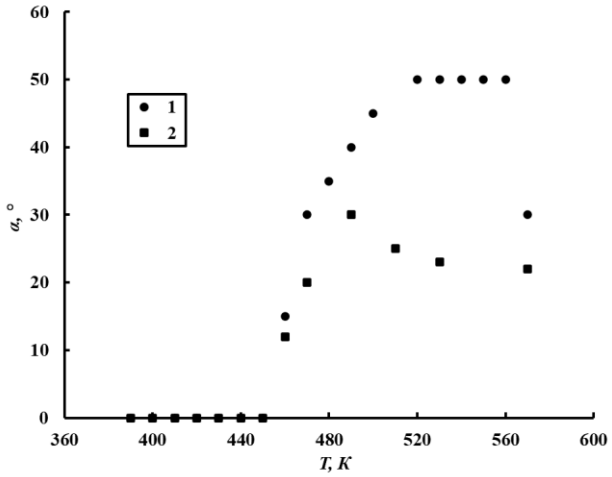


Рис. 2. Изменение угла раскрытия перегретой воды в диапазоне температур T_s=390 – 570 К: 1 – ориентация каналов в горизонтальной плоскости, 2 – ориентация каналов в вертикальной плоскости.

С помощью микроскопического метода был проведен анализ размеров капель, формирующихся при интенсивном вскипании струи перегретой воды. Результаты исследований показали, что с увеличением температуры жидкости происходит уменьшение диаметра образующихся в потоке капель и увеличивается их концентрация. То есть поток становится однородным и мелкодисперсным. Также был определен средний диаметр частиц (средний диаметр Заутера), и представлены их распределения для различных режимов кипения.

Список литературы:

1. Скрипов, В.П. Метастабильная жидкость. М.: Наука, 1972, 312 с.
2. Eggers J., Villermaux E. Physics of liquid jets // Rep. Prog. Phys. 2008. V. 71. P. 1 – 79.
3. Lefebvre A. H., McDonell V. G. Atomization and Sprays, CRC Press, 2017.
4. Pavlenko A. N., Koverda V. P., Reshetnikov A. V., Surtaev A. S., Tsoi A. N., Mazheiko N. A., Busov K. A., Skokov V. N. Disintegration of Flows of Superheated Liquid Films and Jets // Journal of Engineering Thermophysics. V. 22, № 3. 2013. P. 174–193.
5. Alghamdi T., Thoroddsen S. T., Hernández-Sánchez J. F. Ultra-high speed visualization of a flash-boiling jet in a low-pressure environment // International Journal of Multiphase Flow. T. 110. 2019. P. 238-255.

Секция 3 Конвективные течения в однофазных средах

УДК 621.9

РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ ПОГРУЖЕННОГО ТЕЛА В КОНВЕКТИВНОМ СЛОЕ

[1]А. Ю. Васильев, [1]П. Г. Фрик, [1]Е. Н. Попова, [1]А. Н. Сухановский, [2]С. А. Филимонов, [2]А. А. Гаврилов

[1] Институт механики сплошных сред УрО РАН,
614018, Пермь, Академика Королева, 1
[2]Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Новосибирск, Академика Лаврентьева, 1

Термогравитационная конвекция является источником движения в самых различных геофизических системах, таких как атмосфера, океан, мантия, и обеспечивает эффективный перенос тепла и различных примесей [1]. На поведение конвективной системы может оказывать существенное влияние плавающие в ней тела, которые блокируют потоки импульса и тепла. Причем интерес представляет как влияние тел на конвективную циркуляцию, так и влияние конвективных течений на движение тел.

Первое экспериментальное исследование было реализовано в [2], где изучались движения теплоизолирующей пластины, которая свободно плавает на поверхности слоя, подогреваемого снизу и охлаждаемого сверху. Было показано, что движение пластины является колебательным. Влияние размера пластины на ее динамику исследовано в [3], где было показано, что наличие или отсутствие осцилляций определяются ее размером. Большой интерес представляет система со свободно плавающим телом в объеме жидкости, в которой обе горизонтальные границы являются твердыми и изотермическими. Строгий контроль граничных условий упрощает анализ динамики свободно плавающего тела. Эксперимент в такой постановке был реализован в [4], где было показано, что если расстояние от свободно плавающего тела до изотермической границы мало (намного меньше высоты слоя), то наблюдаются регулярные, периодические движения тела от одного края модели до другого. Увеличение расстояния между пластиной и изотермической границей приводит к существенным изменениям в динамике плавающего тела. Наблюдались переходные режимы, когда периодические колебания происходили нерегулярно, и хаотические режимы, в которых отсутствовали интервалы регулярных колебаний.

В данной работе экспериментально и численно исследуется влияние длины конвективного слоя на динамику свободноплавающего в нем диска, погруженного на фиксированную глубину. Эксперименты выполнены при помощи модели, подробно описанной в [5]. Численные исследования выполнены в рамках двухмерных уравнений Буссинеска. Математическая модель и алгоритм описаны в [6].

Варьирование значений управляющих параметров, таких как число Рэлея, соотношение сторон и вертикальное положение пластины, позволяет получить широкий спектр возможных режимов движения тела, от неподвижных и чисто периодических до стохастических. Показано, что устойчивые периодические движения возникают, когда пластина плавает вблизи одного из теплообменников. Увеличение расстояния между пластиной и теплообменником нарушает периодическое движение и (при умеренных числах Рэлея) и приводит к ярко выраженной асимметрии, когда пластина большую часть времени находится вблизи одной из стенок, совершает редкие переходы к противоположной стенке и тут же возвращается обратно. При увеличении числа Рэлея движения пластины от одного края полости к другому появляются вновь, но всегда носят нерегулярный характер. Что касается зависимости поведения системы от геометрии полости, то в экспериментах были обнаружены как нижние, так и верхние пределы периодических движений пластин. При численном моделировании верхний предел не был достигнут - пластина движется квазипериодически через цепочку вихрей разных знаков даже при наибольшем рассматриваемом соотношении сторон. Теплоизолирующая плавающая пластина обеспечивает пространственно-временную вариацию теплового потока и снижает интегральный тепловой поток, однако снижение теплового потока существенно зависит от вертикального положения пластины. Полученные результаты подробно описаны в [7].

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

Список литературы:

1. Голицын Г.С. Природные процессы и явления. Волны, планеты, конвекция, климат, статистика. М: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 344 с.
2. Zhang J., Libchaber A. Periodic boundary motion in thermal turbulence // Phys. Rev. Lett. 2000. Vol. 84. №. 19. P. 4361-4364.
3. Mao Y., Zhong J. Q., Zhang J. The dynamics of an insulating plate over a thermally convecting fluid and its implication for continent movement over convective mantle // J. Fluid Mech. 2019. Vol. 868. P. 286-315.
4. Попова Е.Н., Фрик П.Г. Крупномасштабные течения в турбулентном конвективном слое с погруженным в него подвижным теплоизолятором // Изв. РАН. МЖГ. 2003. №. 6. С. 41-47.
5. Попова Е.Н., Васильев А.Ю., Сухановский А.Н., Фрик П.Г. Динамика протяженного теплоизолятора, погруженного в подогреваемый снизу слой жидкости // Вестник Пермского университета. Физика. 2022. Вып.3. С.38-47.
6. Филимонов С.А., Гаврилов А.А., Дектерев А.А., Литвинцев К.Ю. Математическое моделирование взаимодействия свободно-конвективного течения и подвижного тела // Вычислительная механика сплошных сред. 2023. Том. 16. № 1. С. 89-100.
7. Peter Frick, Sergey Filimonov, Andrei Gavrilov, Elena Popova, Andrei Sukhanovskii and Andrei Vasiliev. Rayleigh–Bénard convection with an immersed floating body // Journal of Fluid Mechanics, (2024), vol. 979, A23

УДК 532; 536.25; 548.25; 621.315.592

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКЦИИ РЕЛЕЯ-БЕНАРА В ТОНКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СЛОЯХ ЖИДКОСТИ

Винокуров В.А[1], Винокуров В.В[1], Кабов О.А[1], Марчук И.В.[1]
[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Микрокапли являются важным элементом в широком спектре технических применений, таких как авиация и двигатели внутреннего сгорания, струйная печать, распыление пестицидов, микро- и нанопроизводство, тонкопленочные покрытия, биохимические анализы, осаждение микрочипов ДНК/РНК, производство новых оптических и электронных материалов, а также охлаждение устройств микроэлектроники и силовой электроники.

Монослой левитирующих микрокапель (Рис. 1) воды получали над нагретым слоем жидкости с помощью источника тепла D=1,6 мм (Люлин и др., 2017), D=3 мм (Шатекова, 2020), 10x10 мм (Зайцев и др., 2017, 2018; Кабов и др., 2017), а также с использованием источника тепла диаметром 12 мм (Шатекова и др., 2018). В настоящее время нет систематических исследований, объясняющих влияние макроконвекции на динамику монослоя левитирующих микрокапель. Также не анализируется возможность влияния структуры конвективных течений в нагретом снизу слое жидкости на динамику монослоя левитирующих микрокапель.

Данная работа посвящена численному 2D, 3D моделированию конвекции в очень тонких цилиндрических слоях воды с числами Прандтоя от 2.15 до 2.4, в зависимости от температуры) высотой 0.1 мм (соотношение сторон Г достигает 400, где Г = D/H, D – диаметр слоя жидкости, H – его высота)), равномерно нагреваемых снизу. Это один из этапов исследования возникновения и динамики «капельного кластера», парящего над горизонтальной границей раздела жидкость-газ на расстоянии, сравнимом с диаметром капель.

Несмотря на то, что конвекция Рэлея-Бенара изучается уже достаточно давно как экспериментально, так и численно, в области малых чисел Ra и Ma, вблизи порога устойчивости, а также в очень тонких цилиндрических слоях жидкости с Г > 100 (Г = D/H, где D -диаметр слоя жидкости, H – его высота), конвективное течение до конца не изучено.

Численно исследована эволюция структуры течения тепловой гравитационно-капиллярной конвекции в тонких цилиндрических слоях воды со свободной поверхностью, нагреваемых снизу. Диаметр слоя составляет от 10 до 40 мм, а высота – от 0.1 до 5 мм. Исследовано влияние высоты слоя и перепада температур на теплообмен, определены границы перехода к нестационарным режимам течения. Исследован относительный вклад плавучести и термокапиллярных эффектов. Определены размеры упорядоченных конвективных ячеек Рэлея-Бенара, равные примерно 0.42 мм при диаметре 40 мм и высоте слоя 400 мкм, что сравнимо с размером монослойных парящих микрокапель над испаряющимся слоем жидкости в атмосфере (Рис.2).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-29-00919) и Института Теплофизики им. Кутателадзе СО РАН (проект 121031800213-0)

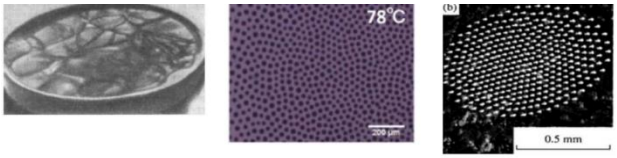


Рис. 1. Монослой левитирующих микрокапель воды над поверхностью горизонтального испаряющегося слоя жидкости при нагревании от локализованных источников тепла разного размера.

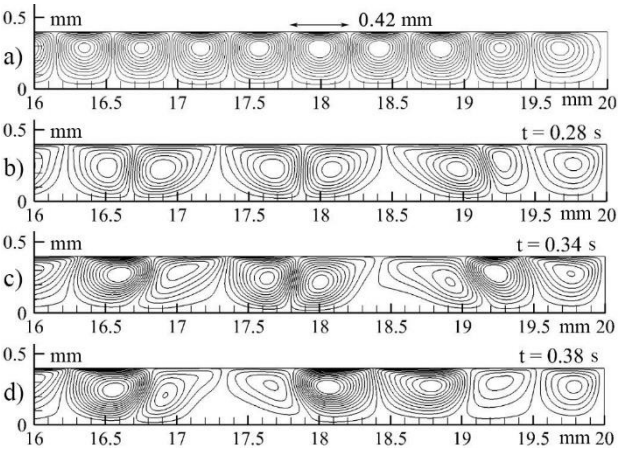


Рис. 2. Изолинии функции тока в сечении плоскости y=0, Г = D/H=100. Стационарный режим: а) ΔT = 0.4^{O}C, Ra = 28,2, Ma = 5396. Нестационарный режим: ΔT = 20^{O}C, Ra = 120.6, Ma = 23970, мгновенные контуры функции тока: б) t = 27.62 с, в) t = 0.3362 с, г) t = 0.3762 с.

Список литературы:

1. Berdnikov V.S., Getting A.V., Markov V.A. Wavenumber selection in Rayleigh-Benard convection: experimental evidence for the existence of an inherent // Experimental heat transfer. 1990. Vol. 3. № 3. P. 269-288. DOI: 10.1080/08916159008946390
2. Fedorets A. A., Marchuk I. V., Kabov O. A. Role of Vapor Flow in the Mechanism of Levitation of a Droplet Cluster Dissipative Structure // Technical Physics Letters. 2011. Vol. 37. No. 2. P. 116–118.
3. Berdnikov V.S., Vinokurov V.A., Vinokurov V.V., Features of convective heat transfer in mixed convection regimes in the Czochralski method with different effects of buoyancy forces and thermocapillary effect. Journal of Physics Conference Series. 2019. 1382(1):012003. DOI:10.1088/1742-6596/1382/1/012003

УДК 536.24

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТЕЧЕНИИ СМЕСИ ГАЗОВ С МАЛЫМ ЧИСЛОМ ПРАНДТЛЯ В СТЕРЖНЕВОЙ СБОРКЕ С РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫМИ РЕШЕТКАМИ

Витовский О.В., Макаров М.С., Лебеда Л.С., Наумкин В.С.
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

В работе приведены результаты исследования теплообмена, а также коэффициентов сопротивления при течении газового теплоносителя в пространстве, образованном плотной упаковкой 7-ми нагреваемых труб. Для фиксации труб использованы 8 дистанционирующих вставок с продольными вытеснителями для обеспечения равномерного поля расходов газа во внутренних и внешних каналах трубного пучка. В качестве рабочего тела использованы газовые смеси с большим отличием в числе Прандтля: воздух (Pr=0.7) и гелий-ксеноновая смесь (Pr=0.23). Опыты проведены в диапазоне чисел Рейнольдса 1926 – 11200.

Рабочий участок, используемый для проведения опытов, содержал 7 тонкостенных нихромовых труб с отношением внешнего диаметра к длине 0,0118 мм. Трубы нагревались переменным электрическим током. Плотность теплового потока от нагреваемых стенок труб к газу считалась постоянной. Необогреваемый начальный участок длиной 80 мм стабилизировал течение перед входом в трубный пучок. Для фиксации труб использованы дистанционирующие решетки, совмещенные с продольными вытеснителями в виде стаканов изготовленных методом SLA 3D печати из термостойкого UV-отверждаемого пластика. Решетки шириной 10 мм расположены на расстояниях 0, 210, 354, 498, 642, 786, 930 и 1074 мм от начала сборки. Стенки решетки имеют толщину 0.95 мм. Предполагалось равномерное поле расходов газа в приосевых и периферийных каналах дистанционирующих решёток за счет одинакового гидравлического диаметра всех каналов d_h = 3 мм.

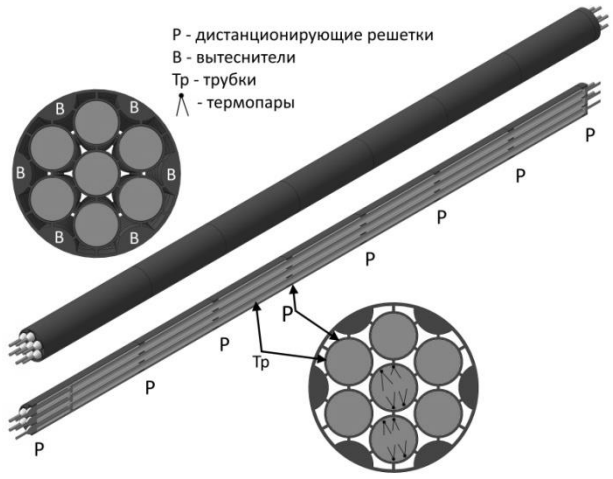


Рис. 1. Модель рабочего участка и схема расположения дистанционирующих решеток и измерительных термопар.

Измерение распределения температуры стенки по длине нагреваемых центральной и одной из периферийных труб производилось с помощью подвижных термопарных зондов с 4-мя медь-константановыми термопарами. Расположение термопар по отношению к соседним нагреваемым трубам показано на рис. 1. Участок размещался в замкнутом газовом контуре, в котором циркуляция газа обеспечивалась компрессором.

Полученные данные о распределении температуры при известной плотности теплового потока на стенках трубок позволили получить распределения безразмерных коэффициентов теплоотдачи по длине пучка, приведенные на рис. 2. Непрерывными линиями показаны распределения локального числа Нуссельта при течении He-Xe смеси газов (толстая линия) при числе Рейнольдса 8240 и при течении воздуха (тонкая линия) при Re=8926. Штриховыми линиями показано изменение среднего значения числа Нуссельта от входа к выходу. Вертикальными штриховыми линиями обозначено положение дистанционирующих решеток. Штрихпунктирные линии показывают значения числа Нуссельта при турбулентном течении теплоносителя в каналах без дистанционирующих решеток.

Наблюдается периодическое повышение и понижение числа Нуссельта в пространстве между решетками. Наличие дистанционирующих решеток приводит к периодическому разрушению гидродинамических и тепловых пограничных слоев. Опыты показали наличие большей тепловой инерции гелий-ксенонового теплоносителя по сравнению с воздухом. Динамический пограничный слой, разрушающийся при преодолении препятствия, для данного теплоносителя утоплен в тепловом пограничном слое, и, как следствие, оказывает меньшее влияние на температурное поле возле стенки. Для воздуха разрушение динамического пограничного слоя сопровождается аналогичным разрушением и теплового пограничного слоя и температурное поле фактически отслеживает динамику потока.

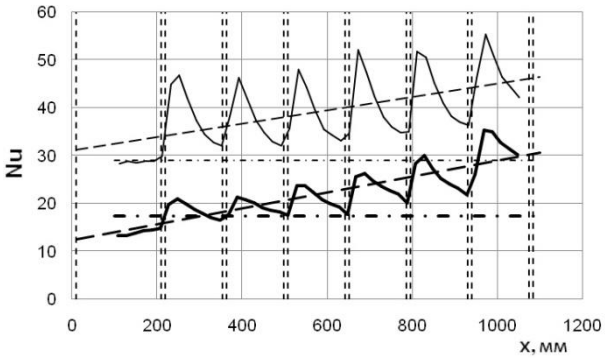


Рис. 2. Распределение числа Нуссельта по длине стержневой сборки при течении He-Xe смеси газов (Pr=0.23) и воздуха (Pr=0.7).

УДК 536.24

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТЕЧЕНИИ ВОЗДУХА И ГЕЛИЙ-КСЕНОНОВОЙ СМЕСИ В СЕМИСТЕРЖНЕВОЙ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКЕ

Лебеда К.С.[1], Макаров М.С.[1], Наумкин В.С.[1,2], Витовский О.В.[1]

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

[2] Новосибирский государственный технический университет,
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Высокотемпературные реакторы рассматриваются в качестве энергетических установок в энергетике, космонавтике и судостроении. Теплоносителем в таких реакторах выступают инертные газы и их смеси [1]. Смесь гелия с ксеноном привлекает особое внимание разработчиков благодаря низкому значению числа Прандтля. В настоящее время активно исследуются тепловые процессы в проточной части активной зоны реакторов с газовым охлаждением. Численное моделирование является неотъемлемой частью таких исследований, но из-за сложной геометрии каналов охлаждения требуется тщательно выбирать модели и методы их решения [2].

В данной работе с применением численных методов исследуется теплообмен при течении воздуха и гелий-ксеноновой смеси с числом Прандтля 0,23 в обогреваемой семистержневой сборке цилиндрических тепловыделяющих элементов с дистанционирующими решётками. Гидравлический диаметр каналов решётки $d_г$ = 3 мм. Характерная относительная высота уступа, образованного дистанционирующей решёткой, $h/d_г$ = 0.22. Сетка структурированная с измельчением элементов к стенкам и решёткам. На боковых гранях задавалось граничное условие симметрии.

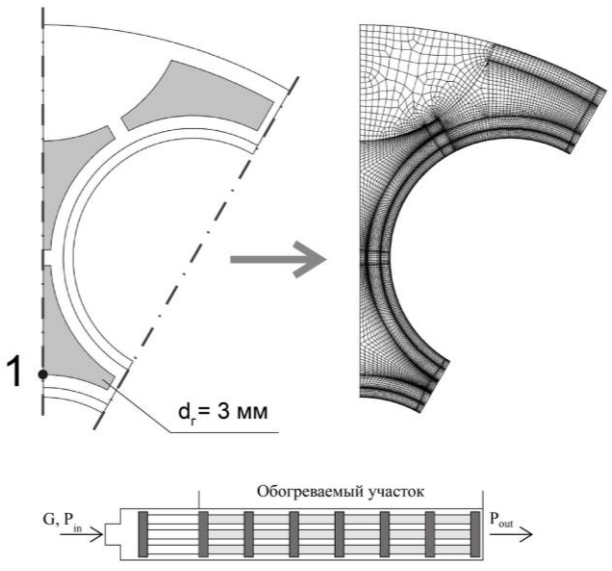


Рис. 1 - Схема исследуемой сборки

Численное моделирование проведено с использованием CFD пакета ANSYS Fluent 2020 R2. Для получения стационарного решения с необходимой точностью проводилась гибридная инициализация и URANS моделирование. Турбулентность моделировалась с использованием Transition SST модели. Дополнительно использовалась поправка на кривизну линий тока с коэффициентом 0,3 и вязкая диссипация кинетической энергии потока в уравнении энергии. Расчёты проводились по неявной схеме второго порядка точности для всех переменных.

Проведено сравнение результатов моделирования с данными эксперимента о распределении температуры стенки на оси симметрии центрального элемента сборки.

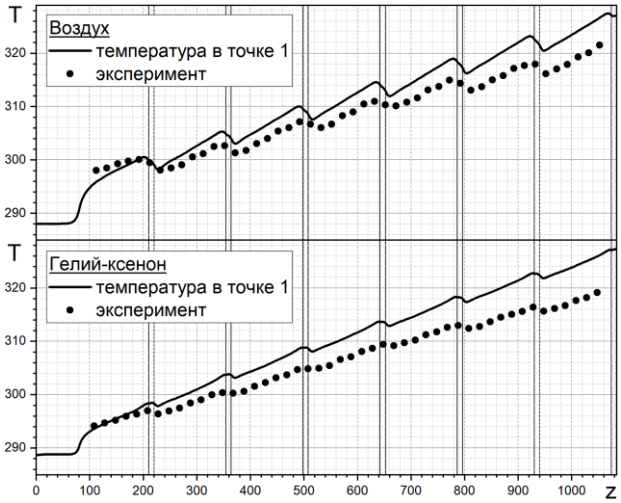


Рис. 2 - Распределение температуры стенки в точке 1 (см. рис.1) по длине сборки.

В результате моделирования получены данные о распределении температур центрального и периферийных тепловыделяющих элементов, а также данные о радиальном распределении температур. Выбранный подход позволяет моделировать особенности течения вблизи дистанционирующих решёток, что важно для корректного моделирования теплообмена.

Список литературы:

1. Noble gas binary mixtures for gas-cooled reactor power plants / M.S. El-Genk, J.-M. Tournier; Nuclear Engineering and Design, 238 (2008) 1353–1372.
2. Numerical investigation on flow and heat transfer characteristics of helium–xenon gas mixture in rod bundles / Kewei Ning, Yuhao He, Fulong Zhao, Xianmin Dong, Minyang Gui, Rulei Sun, Sichao Tan; Progress in Nuclear Energy, 166 (2023) 104947

УДК 621.9

БЕСКОНТАКТНОЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЕ ЖИДКОСТЕЙ ЗА СЧЕТ КОНВЕКЦИИ

Зайцев А.С.[1], Белоногов М.В.[1], Кизириди В.Г.[1]

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

Перемешивание малых объемов жидкостей, например, различных лабораторных проб, является актуальной задачей при проведении исследований в микробиологии и других науках. К настоящему моменту известны различные способы перемешивания жидкостей [1], базирующиеся, в первую очередь, на их механическом перемешивании [2]. Однако, зачастую такой подход является не пригоден в силу конструктивных причин или при работе с особо чистыми или особо агрессивными средами. В то же время, применение канальных смесителей, которые являются популярной альтернативой механическим устройствам, бывает не удобно в случае, когда объем примеси значительно меньше объема базового компонента. Разработка бесконтактных методов массопереноса в стационарном объеме, которые не требуют непосредственного контакта с жидкостью, позволит решить такой класс задач [3].

В представляемом исследовании рассмотрены особенности процесса перемешивания жидкости в плоском слое за счет конвективных течений при точечном нагреве дна емкости.

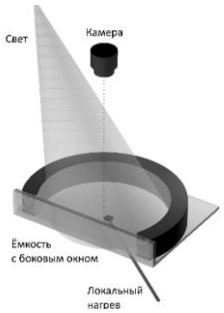


Рис 1. Схема экспериментального стенда для исследования конвекционного перемешивания жидкости

Для исследования особенностей процесса перемешивания дно емкости с жидкостью локально нагревается. Возникающий резкий максимум температуры (T~36 °C) на фоне равновесной температуры слоя (T~20 ÷ 25 °C) инициирует конвекцию в жидкости, которая позволяет распространить внесенную примесь по всему объему. В результате, в слое доминирует течение Марангони (Ma~1000 ÷ 50000). С ростом толщины слоя растет вклад течения Рэлея (Ra~100 ÷ 10000), которое обеспечивает перемешивание жидкости вдоль вертикальной оси слоя. На поверхность цилиндрического слоя жидкости (h~0.2 ÷ 0.5 R) вносилась окрашенная примесь в количестве ~5% от объема слоя. Контроль равномерности перемешивания производится с помощью видеокамеры с внешней подсветкой (см. рис. 1).

Варьируя толщину слоя, мощность нагрева и местоположение центра нагрева на дне емкости, можно управлять процессом перемешивания, добиваясь достаточно равномерного распределения примеси по рабочему объему.

В ходе эксперимента было показано, что в тонком слое жидкости (h<5 мм) могут реализовываться режимы быстрого распространения примеси в приповерхностном слое, когда порция примеси захватывается одним из макроскопических вихрей Марангони. При этом, распространение примеси по глубине остается незначительным.

С ростом толщины слоя свыше 0,3 R, усиление конвекции Рэлея приводит к ускорению вертикального перемешивания и более равномерному распространению примеси по объему. Управляя длительностью процесса в данном режиме, можно регулировать однородность получаемой смеси.

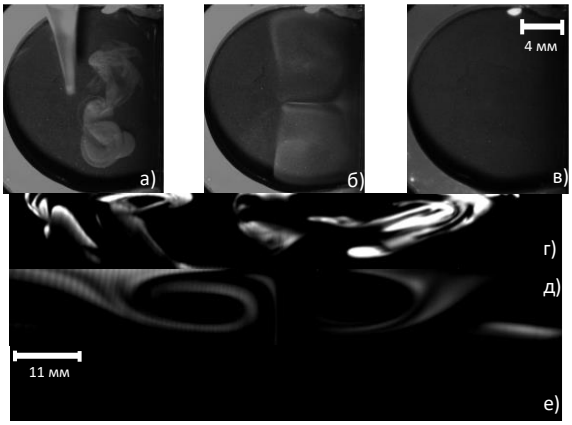


Рис 2. Вид слоя сверху (а-в) и соответствующий вид сбоку, в диаметральном сечении (г-е). Яркие пятна показывают зоны с повышенной концентрацией примеси. Виды (а-в и г-е) соответствуют моментам времени 10 сек, 60 сек и 15 минут после введения примеси

Предложенный подход позволяет реализовать бесконтактное перемешивание различных жидкостей, подбирая параметры нагрева и геометрию емкости так, чтоб достичь указанных диапазонов конвекционных критериев подобия.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 23-73-01200.

Список литературы:

1. Cai G. A Review on Micromixers / Cai G., Xue L., Zhan H., Lin J. // Micromachines. – 2017. – V. 8. – P. 274.
2. Lee C.Y. Microfluidic mixing: A review / Lee C.Y., Chang C.L., Wang Y.N., Fu L.M. // Int. J. Mol. Sci. – 2011. – V. 12. – P. 3263–3287.
3. Ghotli R. A. Liquid–liquid mixing in stirred vessels: a review / Ghotli R. A., Raman A. A. A., Ibrahim S., Baroutian S // Chemical Engineering Communications. – 2013. – V. 200. – P. 595–627.

УДК 532.517

СВОБОДНАЯ КОНВЕКЦИЯ ВОЗДУХА ОКОЛО ГОРИЗОНТАЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННЫХ ОДИНОЧНОЙ ОРЕБРЕННОЙ ТРУБЫ И ОДНОРЯДНОГО ПУЧКА ТРУБ

Засимова М.А., Филатова А.В., Абрамов А.Г.

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

Представляются результаты численного исследования свободноконвективного движения воздуха около расположенных горизонтально оребренных одиночной трубы и однорядного трубного пучка. Задавались следующие геометрические характеристики труб (рис. 1а) [1]: диаметр несущей трубы $d_0 = 26.4$ мм, диаметр сплошных поперечных ребер $d = 56.8$ мм, толщина ребра 0.55 мм, расстояние между ребрами по длине трубы 2.43 мм. Коэффициент оребрения для заданных параметров равен 20.9.

Первая серия расчетов была проведена для задачи о протекании воздуха сквозь пучок с бесконечным числом труб ($N \to \infty$). Поперечный шаг установки труб S_1 варьировался от 58 мм до 145 мм, а его относительное значение $\sigma = S_1/d$ находилось в диапазоне 1.02...2.55. Использовалась конфигурация расчетной области, выделенная на рис. 1б синим цветом. Вдоль оси трубы расчетная область охватывала половину шага оребрения. Расстояния от центра трубы до нижней и верхней границ расчетной области составляли $1.75d$ и $6.75d$, соответственно.

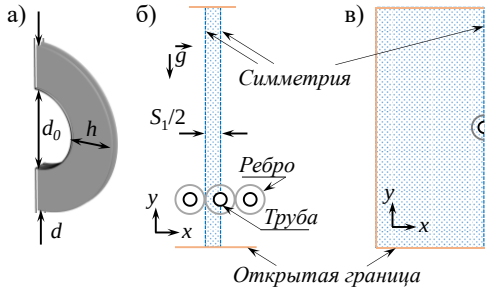


Рис. 1 а) Вид оребренной трубы, расчетная область для б) периодической постановки и в) постановки с одиночной трубой

Вторая серия расчетов выполнялась для задачи о течении около одиночной горизонтальной трубы ($\sigma \to \infty$). Конфигурация расчетной области показана на рис. 1в. Расстояние от центра трубы до нижней, верхней и боковой («открытых») границ расчетной области составляло не менее $4.5d$.

Задачи решались в сопряженной постановке – совместно с течением рассчитывался теплоперенос по алюминиевым ребрам труб. Температура окружающего воздуха $T_0 = 22.1$°C. Температура поверхности несущей трубы T_w полагалась постоянной и варьировалась от 37 до 244°C. Значения числа Грасгофа $Gr = g\beta(T_w - T_0)d_0^3/\nu^2$ составляли $4…60\times10^4$.

Моделирование течения воздуха осуществлялось посредством решения уравнений Навье-Стокса, на основе модели сжимаемого совершенного газа с переменными коэффициентами диффузионного переноса. Для расчетов применялся гидродинамический пакет ANSYS Fluent.

В докладе подробно обсуждаются особенности структуры свободноконвективного течения, формирующегося при изменении значений числа Грасгофа и горизонтального шага установки труб (рис. 2а-б), и интенсивности теплосъема с поверхности труб. В частности, построенные на рис. 2в распределения значений Nu_θ (осредненного по секторам ребра с углом в 4°) вдоль окружного направления θ показывают существенное изменение локальной теплоотдачи при изменении σ.

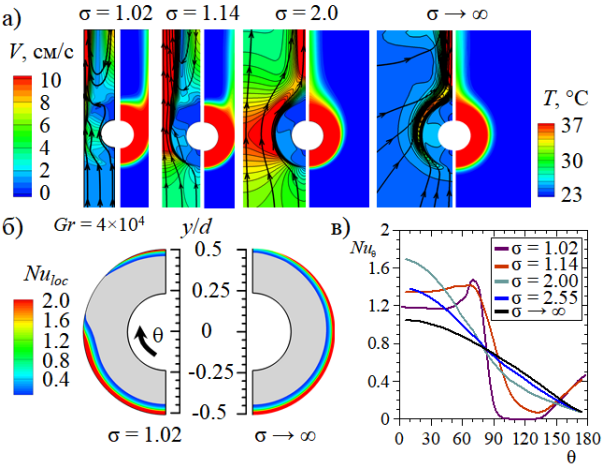


Рис. 2 а) Поля скорости (слева) и температуры (справа) вблизи трубы, б) распределение Nu_{loc} по поверхности ребра, в) распределение вдоль окружного направления осредненного по радиальному направлению числа Nu_θ

Полученные в расчетах осредненные по поверхности трубы значения Nu (рис. 3) сопоставлялись с экспериментальными данными [1] (доступны данные при $\sigma \le 1.25$). Установлено, что в рассмотренном диапазоне значений Gr расчетные и экспериментальные данные хорошо согласуются друг с другом.

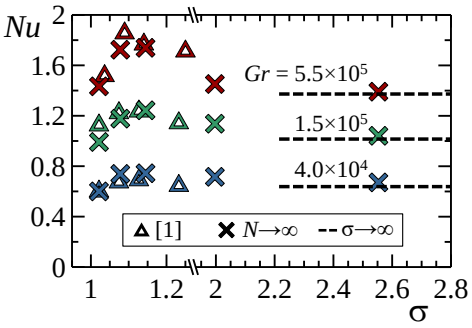


Рис. 3 Осредненные по поверхности ребра значения Nu в зависимости от шага труб σ (для трех значений числа Gr)

Список литературы:

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

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 24-49-100

УДК 536.24

ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО СОПРЯЖЕННОГО КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ПОЛОСТЯХ И В ПЛОСКИХ СЛОЯХ ЖИДКОСТИ

Кислицын С.А.[1], Митин К.А.[1], Бердников В.С.[1,2], Гришков В.А.[1], Михайлов А.В.[1], Юровских Е.А.[1]

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

[2] Новосибирский государственный технический университет,
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Подавляющее большинство исследований свободной конвекции выполнено при стационарных граничных условиях. Исследовались установившиеся течения при заданных перепадах температуры или тепловых потоках [1, 2]. Изучалась пространственная форма течений, определялись пороги устойчивости ламинарных течений и в меньшей степени исследовались процессы ламинарно-турбулентного перехода (ЛТП). Но подавляющее большинство технических и технологических систем, содержащих емкости с жидкостями, работают в режимах разогрева или охлаждения. Оптимизация и надежность таких систем требует знаний о закономерностях нестационарного сопряженного конвективного теплообмена необходимых при проведении оценок термических напряжений различных конструкций. Наглядным примером являются тонкостенные элементы конструкций летательных аппаратов (ЛА). Поля температуры в тонкостенной конструкции ЛА зависят от нестационарного сопряжённого конвективного теплообмена в топливных баках и в воздушных прослойках фюзеляжа[3]. К настоящему времени плохо исследовано влияние процессов ЛТП в пограничных слоях на поля температуры в обтекаемых стенках и течений тепловой гравитационно-капиллярной природы при наличии свободных границ жидкостей [4-7]. Данная работа, является развитием серии работ [4-7].

Экспериментально исследована нестационарная конвекция в слоях этилового спирта со свободной поверхностью после внезапного разогрева электрическим током одной из вертикальных стенок прямоугольной полости. Высоты слоя жидкости менялись от 50 до 170 мм. Плотности тепловых потоков на разогреваемой стенке полости задавались от 274 до 5400 Вт/м^2. Изучено развитие нестационарных пограничных слоев на разогреваемой стенке и течения нагретой жидкости вдоль свободной поверхности, натекающего на противоположную тонкую стенку полости. Состояние потока вдоль свободной поверхности жидкости зависит от его температуры и интенсивности теплоотдачи в окружающую среду. Поля температуры на внешней стороне тонкой стенки и на свободной поверхности слоя жидкости измерялось тепловизором FLIR x6530sc. Компьютерная обработка тепловизионных фильмов позволила построить распределения температуры и градиентов температуры по высоте стенки в зависимости от времени. Определены амплитудно-частотные характеристики пульсаций температуры, вызванные возникновением вторичных течений в набегающем на стенку потоке нагретой жидкости, изучено их влияние на мгновенные поля температуры на стенке на фоне монотонного изменения. Используя цифровую видеосъемку и компьютерную обработку видеофильмов, изучены поля скорости в центральном сечении полости. Построены профили вертикальных и горизонтальных компонент скорости.

Параллельно выполнены численные исследования методом конечных элементов в условиях близких к данным экспериментальным и в полостях других геометрий с тонкими стенками, разделяющими слои жидкости и газа.

Численно методом конечных элементов исследованы процессы развития нестационарных пограничных слоев при монотонном разогреве до заданной температуры внешней поверхности одной из стеклянных стенок вертикальных слоев этилового спирта. Формирования нестационарных пограничных слоев на стенках исследовано в зависимости от высоты и толщины слоев жидкости. Расчеты проведены при числах Рэлея порядка 10^6 при дискретном наборе высот слоя $1 \le H/L \le 9$. Решалась система уравнений термогравитационной конвекции в переменных вихрь, функция тока и температура. Получены распределения нестационарных полей температуры в жидкости и в стенках, поля градиентов температуры и поля скорости в жидкости. Изучена эволюция во времени локальных и интегральных тепловых потоков, в том числе в режимах ЛТП в пограничных слоях.

Список литературы:

1. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости / Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М., М.: Наука, 1972. 392 с.
2. Gebhart B., Jaluria Y., Mahajan R.L., Sammakia B. Buoyency-induced flows and transport. Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 1988. 613 p.
3. Белов В. К., Белов В. В. Прочность и устойчивость ракетных и авиационных конструкций при термосиловом нагружении. Монография / Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. 491 с.
4. Бердников В.С., Гапонов В.А., Гришков В.А., Лиханский П.М., Марков В.А. Влияние нестационарной тепловой гравитационно-капиллярной конвекции на распределение температуры в тонкой вертикальной стенке // Теплофизика и аэромеханика, 2010. Т.17. № 2. С.197–208.
5. Бердников В.С., Гришков В.А., Шумилов Н.А. Развитие нестационарной конвекции в прямоугольной полости при внезапном нагреве вертикальной стенки // Теплофизика и аэромеханика. 2020, Т. 27, № 4. С. 555-563.
6. В.С. Бердников, С.А. Кислицын. Численные исследования нестационарного сопряженного конвективного теплообмена в вертикальных слоях жидкости и газа, разделенных тонкой металлической перегородкой // Теплофизика и аэромеханика, 2021, том 28, № 1. С. 107 – 119.
7. Mitin K.A., Berdnikov V.S., Bodneva N.I., Ryabov V.O. Conjugate heat transfer in the mode of thermal gravitational-capillary convection in the model of a fuel tank after a sudden heating of the sidewall // Journal of Physics: Conference Series (2021), 2119 doi:10.1088/1742-6596/2119/1/012164.

УДК 621.9

ВЛИЯНИЕ ПОРИСТЫХ РЕБЕР НА ЕСТЕСТВЕННУЮ КОНВЕКЦИЮ НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ В ПОЛОСТИ С ИСТОЧНИКОМ ЭНЕРГИИ

Лоенко Д.С., Шеремет М.А.

Научно-исследовательская лаборатория моделирования процессов конвективного тепломассопереноса,

Томский государственный университет,

634050, Томск, пр. Ленина, 36

В настоящее время основной задачей многих исследователей является поиск эффективных методов охлаждения электронных устройств. Одним из известных способов является включение пористых вставок в структуру теплообменника, которые помогают более равномерно распределить тепло, вырабатываемое такими устройствами. При этом применение нанодобавок позволяет улучшить теплопроводные свойства базовых сред.

Предлагаемое исследование посвящено оценке влияния пористых ребер (от одного до трех) на возможность интенсификации теплоотвода от нагретого элемента с помощью естественно-конвективного теплообмена псевдопластичной наножидкости в замкнутой квадратной полости.

Геометрическая постановка задачи изображена на рис. 1. В замкнутой квадратной полости на нижней стенке расположен источник постоянного объемного тепловыделения. Над источником расположена теплопроводная медная подложка. На подложке находятся ребра из алюминиевой пены. Полость заполнена псевдопластичной наножидкостью, базовая среда которой состоит из смеси карбоксилметилцеллюлозы с водой. В качестве наночастиц использовались следующие вещества: Al_2O_3, Cu, CuO, TiO_2.

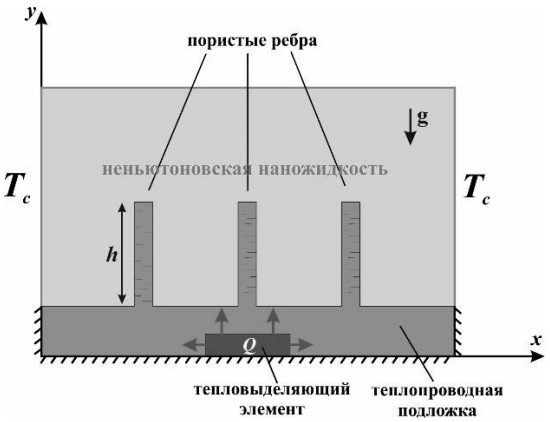


Рис. 1. Область решения задачи

Псевдопластичный характер течения жидкости описывается степенным законом Оствальда-де-Виля [1]:

$$\tau_{ij} = 2\mu_{nf} D_{ij}$$

Эффективный коэффициент вязкости наножидкости вычисляется с помощью соотношения Гуо и др. [2]:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \left(1 + 2.5\phi + 6.5\phi^2\right)\left(1 + 350\frac{\phi}{d_p}\right)$$

Вязкость базовой жидкости в соответствии со степенным законом определяется следующим соотношением: $\mu_{bf} = K_{bf}\left(2D_{kl}D_{kl}\right)^{\frac{n-2}{2}}$, где $n = 0.91$, что характеризует псевдопластичные свойства рабочей среды. Псевдопластичные жидкости имеют вязкость, которая уменьшается с увеличением скорости деформации, что делает такую среду эффективной в задачах охлаждения.

Эффективная теплопроводность наносуспензии вычисляется с помощью экспериментальной корреляции Жанга и Чой [3]:

$$\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_{bf}} = \left(1-\phi\right) + 0.01\frac{\lambda_p}{\lambda_{bf}}\phi + \left(18\cdot 10^6\right)\frac{d_{bf}}{d_p}Re^2 Pr\,\phi$$

Описанная задача моделировалась с использованием системы нестационарных дифференциальных уравнений Навье-Стокса с соответствующими начальными и граничными условиями в безразмерных переменных: “функция тока - завихренность”. Приближение Буссинеска отражало влияние силы плавучести в области наножидкости, модель Дарси–Бринкмана использовалась для описания транспортных процессов в пористых рёбрах. Для решения поставленной задачи был разработан программный комплекс на языке программирования C++, который был апробирован на более простых задачах. Результаты решения модельных задач сравнивались с данными других авторов. Также был проведен анализ сеточной сходимости.

В ходе работы было исследовано влияние определяющих характеристик, таких как материал наночастиц, объемная доля наночастиц, число Рэлея, число Дарси, пористость, количество пористых ребер, а также высота пористых ребер.

Результаты численного моделирования представлены полями функции тока и температуры, которые отражают структуру течения жидкости и температурную стратификацию в полости. Также изучен характер изменения средней температуры источника с течением времени.

Список литературы:

1. Khezzar L., Siginer D., Vinogradov I. Natural convection of power law fluids in inclined cavities // Int J Therm Sci. 2012. V. 53. P. 8.
2. Guo S.S, Luo Z.Y., Tao W., Zhao J.F., Cen K.F. Viscosity of monodisperse silica nanofluids // Bull. Chin. Ceram. Soc. 2006. V. 25(5). P. 52.
3. Jang S.P., Choi S.U.S. Effects of Various Parameters on Nanofluid Thermal Conductivity // Journal of Heat Transfer. 2007. V. 129. P. 617.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-19-00632)

УДК 621.9

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ И КОНВЕКТИВНОЙ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ NOVEC 7100 В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ С ВНУТРЕННИМ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЕМ

Мишин Г.А.[1], Попандопуло Х.Ю.[1], Вершинина Ю.В.[1]
[1]Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Москва, Красноказарменная, 14

ВВЕДЕНИЕ

В работе представлен новый экспериментальный стенд для изучения теплогидравлических характеристик в засыпках из шаров с внутренним тепловыделением, моделирующих тепловыделяющие сборки с микротвэлами (ТВС МТ) в ядерных реакторах малой мощности. Использование ТВС МТ способно повысить энергоэффективность таких реакторов благодаря трехмерному потоку теплоносителя, высокоразвитой поверхности теплообмена и высоким значениям теплоотдачи, а также повышенной живучестью и надежной радиационной безопасностью таких сборок в случае возникновения аварий. Одна из трудностей, возникающая при внедрении микротвэлов в ядерные энергетические установки, состоит в недостаточной изученности процессов теплообмена и гидродинамики в тепловыделяющих сборках и отсутствием расчетных зависимостей. В настоящей работе представлены результаты исследования насыщенной диэлектрической жидкости метокси-нонафторбутана (Novec 7100) в качестве модельной жидкости для ТВС МТ. Приведена зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса при однофазной вынужденной конвекции (см. рис. 2). Получена критериальная зависимость Nu/Pr от числа Рейнольдса, характеризующая интенсивность теплообмена при конвективном теплопереносе (см. рис. 3).

2. РАБОЧИЙ УЧАСТОК

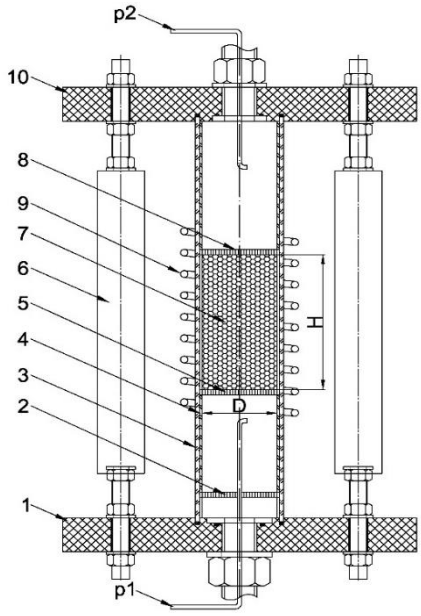


Рис. 1. Рабочий участок. 1,10 – фланцы из стеклотекстолита; 2,5,8 – решетки; 3 – внешняя трубка из поликарбоната; 4 – внутренняя трубка из поликарбоната 6 – шпильки, стягивающие рабочий участок; 7 – шаровая засыпка; 9 – катушка индуктора; p1, p2 – отборы давления.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В ходе экспериментов получены новые теплогидравлические характеристики для жидкости Novec 7100. Данный диэлектрик обладает чрезвычайно низкой динамической вязкостью, что позволило выйти на более высокие числа Рейнольдса и турбулентный режим течения в шаровой засыпке с внутренним тепловыделением по сравнению с традиционно используемой водой. Турбулентный режим поспособствует лучшему перемешиванию и интенсификации процессов конвективного теплообмена в каналах микротвэлов.

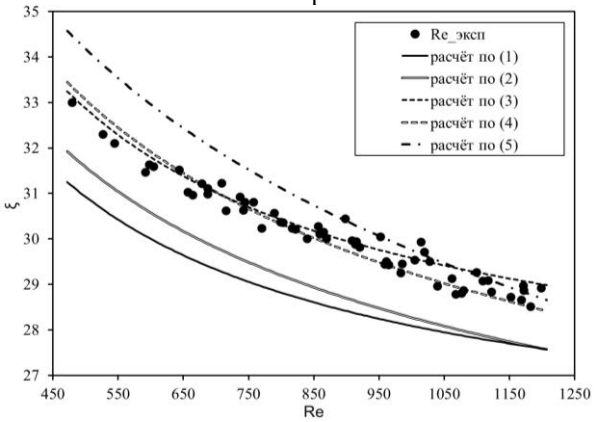


Рис. 2. Зависимость гидравлического сопротивления шаровой засыпки от числа Рейнольдса

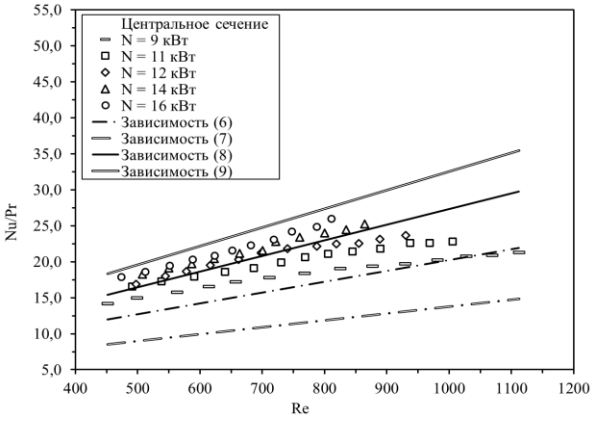


Рис. 3. Зависимость Nu/Pr от числа Рейнольдса

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ключевой задачей данной работы было изучение поведения системы при высоких расходах теплоносителя, соответствующих турбулентному режиму течения. Полученные данные позволяют экстраполировать результаты на реальные условия ТВС МТ в ВВЭР и оценить гидродинамические и теплообменные характеристики при высоких расходах теплоносителя, что имеет важное научное значение для дальнейшего внедрения этой перспективной технологии в ядерных реакторах малой мощности.

УДК 536.24

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ВНУТРЕННЕМ ТЕЧЕНИИ ГАЗОВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В СЕМИСТЕРЖНЕВОЙ СБОРКЕ ТВЭЛОВ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ

Наумкин В.С.[1,2], Макаров М.С.[1,2], Лебеда К.С.[1], Витовский О.В.[1]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] Новосибирский государственный технический университет,
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

В последнее время исследованию теплообмена в газовых реакторах, работающих на гелий-ксеноновый смесях, уделяется большое внимание. Считается, что данный теплоноситель является предпочтительным для автономных космических установок, которые могут работать на Марсе, Луне и околоземной орбите. Термодинамические и переносные свойства гелий-ксеноновой смеси изучены довольно подробно. Данные газовые смеси обладают низким значением числа Прандтля, что изменяет законы теплообмена по сравнению с чистыми газами или другими газовыми смесями.

Предлагаемые эмпирические зависимости для оценки коэффициента теплоотдачи в гелий-ксеноновых смесях [1,2] дают существенно разные значения при одинаковых числах Рейнольдса. Отличие в оценке числа Нуссельта может составлять 3.5 раза. В большинстве работ эмпирические зависимости для коэффициента теплоотдачи получены для каналов круглого сечения. Применимость данных формул для каналов с поперечным сечением отличным от круга, в частности для каналов, образованных стенками тепловыделяющих элементов с разделительными решётками, остаётся под вопросом. Поскольку разделительные решётки с дистанционирующими вставками вносят сильное возмущение в динамику течения (создаются отрывные зоны до и после решётки), что сказывается на значении коэффициента теплоотдачи. Кроме того, газовый теплоноситель ускоряется по длине канала, что при достижении околозвуковых скоростей приводит к захолаживанию потока. Поэтому до сих пор сохраняется актуальность поиска подобной зависимости для протяжённых каналов сложного поперечного сечения.

Данная работа посвящена численному исследованию теплообмена в сборке, состоящей из 7 тепловыделяющих элементов с разделительными решётками. Для экономии вычислительных ресурсов рассматривалась симметричная задача (сектор равный 1/12 от сечения сборки). На рис. 1 представлена геометрия рассматриваемой области. Сечение проходит через разделительную решётку. Форма разделительной решётки и размер вытеснителей были подобраны так, чтобы все продольные каналы обладали одинаковыми гидравлическими диаметрами.

На стенках твелов задавалась постоянная плотность теплового потока, на внешней границе – адиабатные условия, на границах между тепловыделяющими элементами, разделительными решётками и теплоносителем задавалось условие сопряжения.

Материал стенок и разделительных решёток – нихром. Теплоноситель – гелий-ксеноновая смесь с массовой долей гелия – 7%.

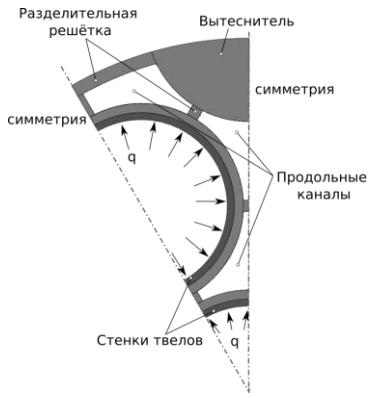


Рис. 1. Геометрия рассматриваемой сборки, состоящей из 7 тепловыделяющих элементов, 1/12 часть.

Моделирование проводилось в Ansys Fluent 2020R2 с использованием transition SST модели турбулентности [3].

На рисунке 2 представлено характерное поле температуры внутри сборки. Наибольшую температуру имеет центральный стержень.

Проведена серия расчётов для случаев высокой температуры и давления на входе в каналы. Получено обобщение в виде зависимости числа Нуссельта от числа Рейнольдса.

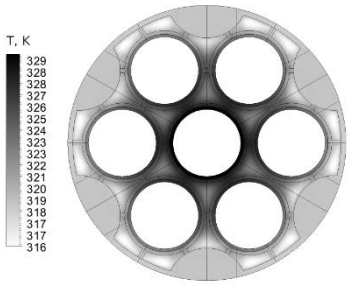


Рис. 2. Характерное поле температуры в семистержневой сборке тепловыделяющих элементов.

Список литературы:

1. Zhou B. et al. Nusselt number correlation for turbulent heat transfer of helium–xenon gas mixtures // Nuclear Science and Techniques. 2021.- Vol. 32, № 11, P. 128.
2. McEligot D.M., Taylor M.F. The turbulent Prandtl number in the near-wall region for Iow-Prandtl-number gas mixtures // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1996.- Vol. 39, pp. 1289–1295.
3. Makarov M.S. et al. Investigation of hydraulic resistance and heat transfer in the flow of He-Xe mixture with a small Prandtl number in a quasi-triangular pipe // International Journal of Heat and Mass Transfer 2022. – Vol. 199. – Art.123427, pp. 10

УДК 532.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ В ФОТОБИОРЕКТОРАХ

Наумов И.В.[1,2], Шарифуллин Б.Р.[1,2], Тинтулова М.В. [1,2], Геворгиз Р.Г.[3]
[1]Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2]Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1
[3]Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН,
299011, Россия, Севастополь, проспект Нахимова, 2

Одним из важнейших этапов становления современной биотехнологии интенсивного культивирования клеток, тканей и микроорганизмов является разработка и конструирование биореакторов. Для обеспечения оптимальных условий культивирования разработано множество различных конструкций биореакторов как узкоспециализированных, так и универсальных [1-3]. Многочисленные исследования показали, что независимо от типа биореактора ключевым параметром, определяющим эффективность массообмена, является гидродинамика течения культуральной среды. Несмотря на попытки спрогнозировать течение в реальном биореакторе, используя как расчетные, так и экспериментальные методы, существует всего лишь несколько примеров удачного гидродинамического проектирования [1, 3, 4]. Поэтому динамика движения жидкости в биореакторах по-прежнему является одной из областей, требующих пристального внимания.

В настоящей работе проведено исследование эффективности влияния способа перемешивания и конфигураций реакторов на реальном биологическом объекте – фототрофных микроводорослях (спирулина/хлорелла/порфиридиум). Исследована динамика роста плотности и вязкости культуры в накопительном режиме культивирования. Изучена гидродинамика вихревого течения на модельных жидкостях.

Для выращивания микроводорослей использовали три фотобиореактора, заполненных культуральной средой объемом от 1,5 до 5 литров, с различным типом перемешивания: культиватор плоскопараллельного типа с барботажным типом перемешивания, газовихревой фотобиоректор и вихревой реактор с вращающимся диском, помешенным в культуральную среду (рис.1). В культиваторе плоскопараллельного типа (объем 2,5 литра) суспензию водорослей барботировали смесью воздуха и CO_2. Газовихревой реактор состоит из закрытого цилиндра, в крышку которого встроено лопаточное колесо (активатор). Активатор вращается с частотой до 50 Гц. При помощи активатора в реакторе создается газовый вихрь над поверхностью суспензии. Из-за воздействия воздушного вихря на границу раздела в суспензии возникает вихревое движение. В третьем, используемом в эксперименте, вихревом реакторе для перемешивания суспензии водорослей используется гладкий диск, опущенный на полуглубину суспензии, вращающийся с регулируемой частотой до 10 Гц,

Была изучена динамика роста плотности культуры фототрофных микроводорослей в накопительном режиме культивирования в фотобиореакторах с различным типом перемешивания в зависимости от скорости движения субстрата. Определены закономерности вихревого движения и структуры течения модельной среды в зависимости от ее объема, вязкости и интенсивности движения.

Выявлены критерии вихревого движения в фотобиореакторах, способствующие массообмену и интенсификации биологических и химических процессов в вихревых реакторах. Продемонстрировано влияние способа перемешивания и конфигураций реакторов на реальном биологическом объекте – фототрофных микроводорослях, где были установлены функциональные зависимости между кривыми роста и интенсивностью вихревого перемешивания.

Экспериментально показано, что в отличие от применения традиционных методов перемешивания, технология перемешивания воздушным вихрем, сформированным активатором, за счет перепада давления и трения воздушного потока, обеспечивает деликатное, но эффективное перемешивание без пенообразования, кавитации, высокотурбулентных, застойных зон и зон локального перегрева. В области над рабочей жидкостью создается интенсивное вихревое движение, которое плавно приводит в меридиональное движение культивируемую биомассу посредством увеличения скорости на границе раздела.

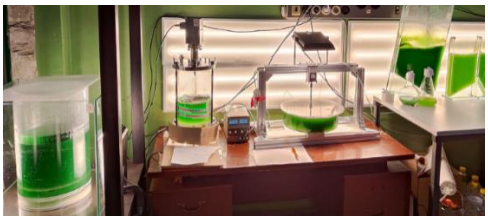


Рис. 1. Фотография фотобиоректоров с различным типом перемешивания.

Список литературы:

1. Sucosky P. et al. Fluid mechanics of a spinner-flask bioreactor //Biotechnology and bioengineering. 2004. Vol. 85. P. 34-46.
2. Yu P. et al. Fluid dynamics of a micro-bioreactor for tissue engineering //Fluid Dyn. Mater. Process. 2005. Vol. 1. P. 235-46.
3. Dusting J., Sheridan J., Hourigan K. A fluid dynamics approach to bioreactor design for cell and tissue culture //Biotechnology and bioengineering. 2006. Vol. 94. P. 1196-1208.
4. Williams K.A., Saini S., Wick T.M. Computational fluid dynamics modeling of steady-state momentum and mass transport in a bioreactor for cartilage tissue engineering //Biotechnology progress. 2002. Vol. 18. P. 951-963.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 24-19-00233

УДК 534.13: 533.6.011.5

АВТОКОЛЕБАНИЯ В РЕЗОНАТОРЕ ГЕЛЬМГОЛЬЦА С НЕРАВНОМЕРНО НАГРЕТЫМИ СТЕНКАМИ: ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Пашин А.В.[1]

[1] Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет»,
443100, Россия, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус

Теоретические и экспериментальные исследования автоколебаний газа в резонаторах позволяют создать теоретический фундамент для управления процессами, протекающими в различных акустических системах (двигателях внутреннего сгорания, выхлопных системах, турбинах электростанций и т.д.) [1 – 3].

Как известно, для самовозбуждения и поддержания незатухающих колебаний необходимо иметь: во-первых, колебательную систему, во-вторых, источник энергии, в-третьих, нелинейный элемент (в общем случае это может быть и сама колебательная система нелинейная, и/или источник энергии иметь нелинейность).

В качестве конкретного примера системы с инерционным самовозбуждением рассмотрим резонатор Гельмгольца с неравномерно нагретыми стенками, представляющего наиболее простое устройство, в котором реализуется автоколебательный процесс [4,5]. Резонатор Гельмгольца включает шаровую часть 1 и трубку 2 (рис. 1а). На рис. 1б дана кривая изменения температуры стенки по высоте резонатора.

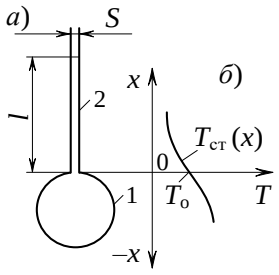


Рис.1 (а) Резонатор Гельмгольца 1 - резервуар с воздухом объемом V, 2 - трубка длинной l и площадью сечения S; (б) распределение

Учет непериодического источника теплоты позволил получить математическую модель автоколебаний, которая включает в себя обыкновенное дифференциальное уравнение третьего порядка с постоянными коэффициентами относительно искомой функции перемещений газа во времени и соответствующие краевые условия.

$$\frac{d^3x(t)}{dt^3} + A\frac{d^2x(t)}{dt^2} + B\frac{dx(t)}{dt} + Cx(t) = 0\,, \qquad (1)$$

где x – перемещение; t – время; A, B, C – коэффициенты, включающие геометрические характеристики резонатора, свойства газа и параметры источника теплоты.

$$x(0) = 1\,; \quad \frac{dx(0)}{dt} = 0\,; \quad \frac{d^2x(0)}{dt^2} = 0\,. \qquad (2)$$

Получено аналитическое решение задачи (1), (2) и формула критического значения градиента температуры по длине резонатора, определяющего условия возникновения автоколебаний. Анализ точного аналитического решения полученного уравнения позволил сделать следующие важные для акустической техники выводы: уменьшение диаметра трубки резонатора приводит к увеличению амплитуды колебаний газа и уменьшению собственной частоты; самовозбуждение колебаний происходит лишь при больших значениях градиента температур между шаровой частью и трубкой резонатора; с увеличением коэффициента теплоотдачи между газом в шаровой части резонатора и его стенкой амплитуда колебаний возрастает, а время их затухания уменьшается; для обеспечения незатухающих автоколебаний необходимо совместное (согласованное) увеличение коэффициента теплоотдачи и градиента температур между шаровой частью и трубкой регенератора.

Для проверки правильности рассмотренной математической модели и полученного решения проведено сравнение характеристик, полученных при моделировании колебательных процессов и на испытательной установке термоакустического преобразователя (резонатора Гельмгольца с неравномерно нагретыми стенками). При моделировании процесса термоакустических колебаний в резонаторе Гельмгольца полученное значение частоты дает хорошее согласие с результатами эксперимента. Снижение эффективности работы резонатора обусловлено формированием стоячих волн и недостаточной вовлеченностью газа в процесс теплообмена, что подтверждается оценкой основных параметров.

Список литературы:

1. Киселев С. П., Киселев В. П., Зайковский В. Н. О механизме автоколебаний при натекании сверхзвуковой струи на преграду. 1. Преграда с иглой // ПМТФ. 2014. Т. 55, № 4. С. 50–59.
2. Курзин В.Б. Модель возникновения акустических автоколебаний в камере при истечении струи через ее сопло // ПМТФ, 58:6 (2017), 100–113
3. Г. Ф. Горшков, В. Н. Усков Автоколебания в сверхзвуковых перерасширенных импактных струях // ПМТФ. 2002. Т. 43, № 5. С. 49–54.
4. Cui S., Harne R. L. Acoustic-structure interaction in an adaptive helmholtz resonator by compliance and constraint // Journal of Vibration and Acoustics. 2020. Vol. 142. Is. 2. № 021005.
5. Kurdi M., Nudehi S., Duncan G. S. Tailoring plate thickness of a Helmholtz resonator for improved sound attenuation // Journal of Vibration and Acoustics. 2019. Vol. 141. Is. 3. № 034502.

УДК 62-144.3

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ГАЗОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН ПОТОКОВ ГАЗА ПРИ ЗАПОЛНЕНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОЛОСТИ ЧЕРЕЗ КАНАЛЫ РАЗНОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

Плотников Л.В.[1], Давыдов Д.А.[1], Красильников Д.Н.[1], Шурупов В.А.[1]

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

Тепловые двигатели на базе поршневых машин остаются востребованными преобразователями энергии в разнообразных отраслях промышленности во всем мире [1]. Известно, что процессы газообмена (наполнение и опорожнение цилиндра через тарельчатые клапаны) определяют технико-экономические показатели двигателя [2, 3]. Поэтому необходимо дальнейшее изучение и совершенствование физических процессов в подводящих (впускных) и отводящих (выпускных) системах для улучшения эксплуатационных и экологических показателей двигателей.

Цель данной работы состояла в оценке газодинамических и теплообменных характеристик пульсирующих потоков воздуха в подводящей системе с клапанными каналами, имеющими разную форму поперечного сечения.

Исследования проводились на модели одноцилиндрового двигателя с приводом коленчатого вала от электрического мотора. Скорость вращения вала регулировалась в диапазоне от 600 до 3000 мин$^{-1}$. Пульсирующий режим течения воздуха создавался за счет возвратно-поступательного движения поршня (разряжение в цилиндре) и работы клапанов.

Рассматриваемая газодинамическая система состояла из подводящей (прямолинейной) трубы, клапанного (криволинейного) канала, впускного клапана и полости (цилиндра) переменного объема. Для управления газодинамическими и теплообменными характеристиками потоков в подводящей системе и цилиндре двигателя использовались клапанные каналы с поперечными сечениями в форме квадрата и треугольника. Внутренний диаметр круглого (базового) канала составлял 32 мм, сторона квадратного – 32 мм, треугольного – 54 мм. Известно, что в профилированных трубах возникают продольные вихревые структуры, которые оказывают заметное влияние на газодинамику и теплообмен потоков [4].

В ходе проведения опытов измерялись мгновенные значения местной скорости и локального коэффициента теплоотдачи α_c пульсирующего потока воздуха в подводящей трубе. Для этого использовался метод тепловой анемометрии и специальные тепловые датчики (подробнее см. [4]). Дополнительно измерялись давление и температура потока, а также скорость вращения вала и положение поршня в цилиндре.

Установлено, что степень турбулентности Tu пульсирующего потока воздуха в подводящей системе с профилированными клапанными каналами существенно возрастает. Так, применение квадратного канала вызывает рост Tu на 11-26 % по сравнению с базовой конфигурацией канала; а использование треугольного клапанного канала приводит к увеличению значений Tu до 19,5 %. Это объясняется наличием вихревых структур в углах профилированных труб.

Влияние профилированных клапанных каналов на коэффициент теплоотдачи α_c пульсирующих потоков в подводящей системе является неоднозначным (рис. 1).

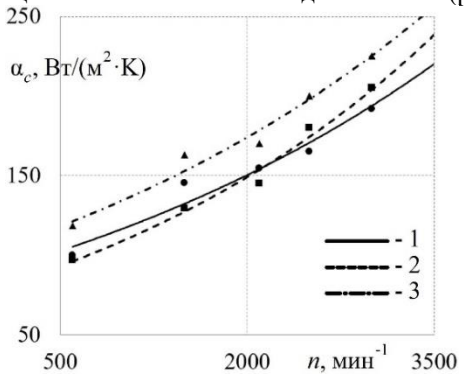


Рис. 1. Зависимости коэффициента теплоотдачи α_c от скорости вращения вала n для нестационарного течения воздуха через впускные системы с разными поперечными сечениями каналов: 1 – круг; 2 – квадрат; 3 – треугольник

Так, применение треугольного канала приводит к росту α_c на 9-18 % по сравнению с базовой системой. Тогда, как в случае использования квадратного каналом, наоборот, имеет место незначительное снижение α_c на 3-10 % (эти величины находится в пределах неопределенности эксперимента).

Потенциально рост коэффициента теплоотдачи от стенок канала к потоку может вызвать небольшое повышение температуры рабочего тела и, соответственно, улучшить процесс смесеобразования топливно-воздушной смести в процессе наполнения цилиндра.

Полученные данные могут быть полезными для совершенствования методик расчета и проектирования систем газообмена поршневых машин с целью улучшения их технических, экономических и экологических характеристик.

Список литературы:

1. Piacenti V., Tschoeke H., Van Gerpen J.H. Piston Machines // Springer Handbook of Mechanical Engineering. 2009. P. 879-945.
2. Wang G., Yu W., Li X., Yang R. Influence of fuel injection and intake port on combustion characteristics of controllable intake swirl diesel engine // Fuel. 2020. Vol. 262. A.n. 116548.
3. Sadatpour S.H., Madadi A., Ahadian R. Numerical optimization of S-shaped intake performance using special cross-sectional profiles // Thermophysics and Aeromechanics. 2022. Vol. 29(5). P. 689-702.
4. Plotnikov L.V. Unsteady gas dynamics and local heat transfer of pulsating flows in profiled channels mainly to the intake system of a reciprocating engine // Int. J. Heat Mass Transfer. 2022. Vol. 195. A.n. 123144.

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

УДК 532.5.013.12:536.24

ГИДРОДИНАМИКА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ РЕШЕТЧАТЫХ КОНСТРУКЦИЙ В СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ В СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Саетгараев А.А.[1], Лопатин А.А.[1], Габдуллина Р.А.[1]

[1] Казанский национальный исследовательский технический университет им. Туполева-КАИ, 420000, Россия, г. Казань, К. Маркса, 10

На сегодняшний день, зачастую, конструкция систем охлаждения и термостабилизации сопоставима по сложности с самими приборами, в которых они работают. Это приводит к снижению надежности изделий. Одним из очевидных выходов является разработка решений, позволяющих повысить теплогидравлическую эффективность существующих методов отвода тепла. К таким решениям, способствующим снижению термической нагрузки на критически важные элементы конструкции, можно отнести применение в радиаторах систем охлаждения пространственных решетчатых конструкций, выполненных методом лазерного селективного спекания металлического порошка. В современно тематической научной литературе в последнее время достаточно большое внимание уделяется этому передовому способу повышения интенсивности теплоотдачи [1-3]. Важным аспектом систем, выполненных на основе решетчатых конструкций, являются гидродинамические характеристики, от которых в значительной степени зависит общая теплогидравлическая эффективность. В рамках данной работы рассмотрено влияние геометрических параметров конструкции рабочих участков на гидравлические характеристики течения воздуха. Схема экспериментальной установки и внешний вид рабочих участков представлены на рис.1 и 2.

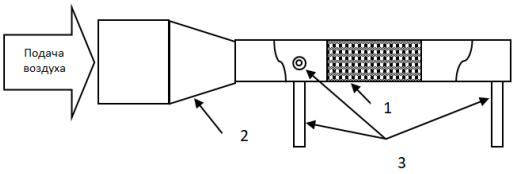


Рис.1. Схема рабочего участка:1 – место установки решетчатого элемента, 2 – входной конфузор, 3 – отборники статического и полного давления.

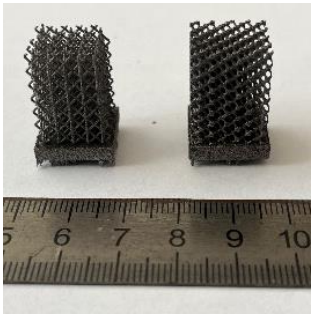


Рис.2. Внешний вид рабочих участков.

Результаты экспериментальных исследований представлены на рис.3 и 4. Качественный характер полученных зависимостей соответствует данным, представленным в [4]. Как следует из представленных зависимостей, гидравлическое сопротивление с ростом числа Рейнольдса монотонно снижается и при Re≈10000 становится практически автомодельным. При этом во всем диапазоне режимных параметров на участке №1 обеспечивается минимальное значение ζ. Как и следовало ожидать, рост перепада давления обеспечивает такое же увеличение скорости движения теплоносителя. При этом, вполне прогнозируемо, что реализуемая скорость на рабочем участке №1 выше, чем на участке №2 во всем диапазоне перепадов давления.

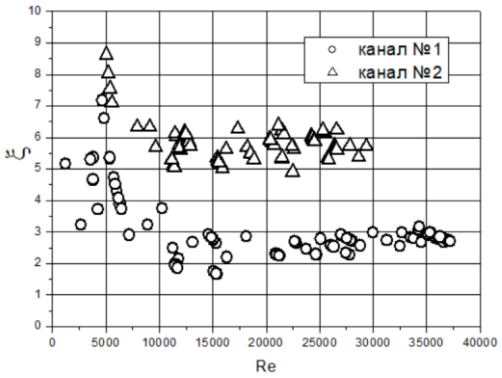


Рис.3. Зависимость гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса.

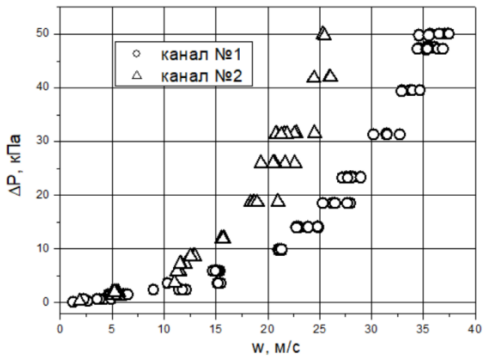


Рис.4. Зависимость скорости теплоносителя от перепада давления на рабочем участке.

Список литературы:

1. Hanbing Ke, Tariq Amin Khan, Wei Li, Yusheng Lin, Zhiwu Ke, Hua Zhu, Zhengjiang Zhang, Thermal-hydraulic performance and optimization of attack angle of delta winglets in plain and wavy finned-tube heat exchangers, Applied Thermal Engineering, Volume 150, 2019, P.1054-1065.

2. Xiang Wang, Min Chen, Derrick Tate, Hamidreza Rahimi, Shunqi Zhang, Numerical investigation on hydraulic and thermal characteristics of micro latticed pin fin in the heat sink, International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 149,2020. P.119-157.

3. Deng, Fanghang, Nguyen, Quang-Kha, Zhang, Pu. Multifunctional Liquid Metal Lattice Materials through Hybrid Design and Manufacturing, Additive Manufacturing, Volume 33, 2020, P.101-117.

4. Поляев В.М., Майоров В.А. Гидродинамика и теплообмен в пористых элементах конструкций летательных аппаратов. - М.: Машиностроение, 1988. - 168 с.

УДК 536.24

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В ЭЖЕКТОРЕ С ЭФФЕКТОМ КОАНДА

Карпов П.Н., Кульпанович Г.Т., Отмахов О.Ю., Скибина Н.П., Чохар И.А., Пахомов М.А.
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Исследование характера газодинамического взаимодействия и смешения поперечных кольцевых струй, вдуваемых в цилиндрический канал по нормали к его оси, имеет большой научный и практический интерес. Эжекция (подсос) в пристенный струйный поток газа из окружающей среды, который затем уносится от места всасывания за счет энергии вторичной струи [1,2]. Струя жидкости, вытекающая из сопла (кольцевой щели), стремится отклониться по направлению к стенке и при определенных условиях прилипает к ней при отсутствии отрыва потока от поверхности стенки [3]. Теоретического объяснения этого эффекта пока не существует. Эффект Коанда (ЭК) приобрел широкое использование в системах вентиляции и кондиционирования, энергетике, авиации, и использование этого эффекта достаточно подробно описано в литературе [3,4].

К настоящему времени накоплено определенное количество экспериментальных и расчетных данных по исследованию процессов смешения в эжекторе Коанда. Однако подробных данных по локальной структуре течения, турбулентности и полям давления в литературе при вариации расхода вторичного потока и параметров щели в литературе нами не найдено. Данная работа посвящена экспериментальному и численному исследованию локальной структуры течения и распределений статического и динамического давлений в диффузоре и сопле.

Измерение давления на оси эжектора осуществлялось трубкой Пито-Прандтля, которая располагалась на координатном устройстве. Для измерения статического давления на стенках выходного диффузора эжектора и сопла было просверлено 21 и 28 отверстие диаметром 0,5 мм, соответственно. Как видно характер поведения кривых при расходах до $Q \leq 14{,}6$ г/с качественно подобен и характеризуется небольшим ростом абсолютной величины разрежения в начальной части диффузора. Исключение составляют данные экспериментов для наибольшего исследованного расхода $Q = 15{,}2$ г/с. Для этого расхода получено резкое увеличение разрежения как на оси, так и на стенке диффузора (см. рис. 1). Наблюдается значительное увеличение разрежения (до 5-ти раз) в начальных сечениях на стенке диффузора.

Для математического моделирования течения газа в эжекторе использовался *RANS*-подход. Численное решение задачи проведено в осесимметричной постановке для сжимаемого газа с постоянной вязкостью и теплофизическими свойствами воздуха, среда подчиняется уравнению состояния Менделеева-Клапейрона. В начальный момент времени внутренний объем эжектора заполнен неподвижным воздухом с температурой T=300 K и давлением P=10^5 Па. Решение системы осредненных уравнений Навье-Стокса производилось совместно с уравнениями полуэмпирической k-ε модели турбулентности, численная схема II порядка точности по пространству (против потока). По результатам расчетов получены данные о структуре течения во внутреннем объеме эжектора, в том числе распределения осевой скорости (рис.2), статического давления на оси и стенках конструкции.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 24-29-00038.

Список литературы:

1. Coanda H. U.S. Patent 1104963 Improvement in Propellers. 1911. USA.
2. Соколова И.Н. Экспериментальное исследование пределов реализации течения Коанда // Ученые записки ЦАГИ. 1983. Т. XIV, № 4. С. 124–126.
3. Trancossi M. An overview of scientific and technical literature on Coanda effect applied to nozzles // SAE Technical Papers. 2011. Paper 2011-01-2591. 13 pages.
4. Tashtoush B.M., Moh'd A.N., Khasawneh M.A. A comprehensive review of ejector design, performance, and applications // Appl. Energy. 2019. V. 240. P. 138–172.

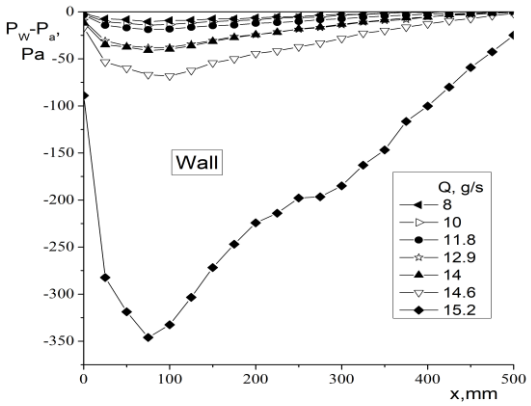


Рис. 1. Распределения разности статического давления и атмосферного на стенке $P_W - P_a$ по длине диффузора. h = 0,25 мм.

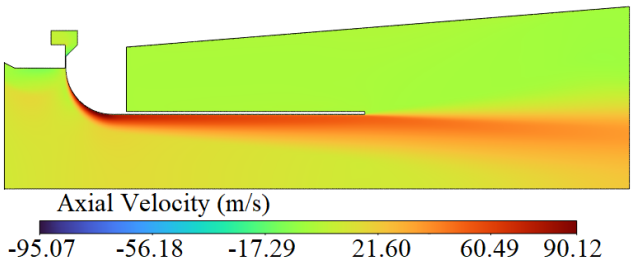


Рис. 2. Распределение осевой скорости во внутреннем объеме эжектора

УДК 532.5

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА ТРЕХ НЕСМЕШИВАЕМЫХ ЖИДКОСТЕЙ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КОНТЕЙНЕРЕ

Тинтулова М.В. [1,2], Наумов И.В. [1,2], Шарифуллин Б.Р. [1,2], Штерн В.Н. [2]

[1]Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1
[2]Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Развитие воздушно-вихревых биореакторов [1–4] привлекло внимание исследователей к закрученным потокам двух несмешивающихся жидкостей, заполняющих цилиндрический контейнер. Тороидальная циркуляция в цилиндре обеспечивает перемешивание, способствующее эффективному росту биологических культур [2]. Простейшей моделью вихревого биореактора служит вертикальный цилиндрический контейнер, нижний диск которого вращается, создавая закрученный замкнутый поток, в то время как боковая стенка контейнера неподвижна [4]. Простая геометрия устройства и ограниченный характер движения жидкостей облегчают подробные экспериментальные и расчетные исследования. Недавние работы показали, что вихревые потоки двух несмешивающихся жидкостей имеют несколько парадоксальных свойств, имеющих фундаментальное и практическое значение. В данной работе изучается движение трех несмешивающихся жидкостей в цилиндрическом контейнере, генерируемое вращением нижнего диска.

Экспериментальное исследование проводилось в открытом цилиндрическом контейнере с нижним вращающимся диском (см. рис. 1(а)). Цилиндрический контейнер (радиус R = 47 мм, высота H = 300 мм) выполнен из оптически прозрачного стекла. Движение жидкости задавалось нижним вращающимся диском радиусом $R_D = 46{,}5$ мм. В качестве нижней жидкости (L) использовался 85% водный раствор глицерина (плотность $\rho_L = 1220$ кг/м^3, кинематическая вязкость $\nu_L = 90$ мм^2/с), в качестве средней жидкости (M) использовалось подсолнечное масло ($\rho_M = 916$ кг/м^3, $\nu_M = 41.9$ мм^2/с), а в качестве верхней жидкости (U) использовался спиртовой раствор глицерина (спирт-глицерин 1:6, $\rho_U = 897$ кг/м^3, $\nu_U = 4.5$ мм^2/с). Экспериментальные исследования структуры течения были выполнены при высоте средней жидкости h_M от 0.1R до R, высота нижней h_L и верхней h_U жидкости равнялись R. Исследования проводились при помощи метода PIV в горизонтальных сечениях в средней жидкости на расстоянии 1 мм от границы с нижней жидкостью (сечение S_1) и на 1 мм ниже границы с верхней жидкостью (S_2), а также в верхней жидкости на 1 мм выше границы со средней жидкостью (S_3) (см. Рис. 1(б)). Интенсивность течения характеризовалась числом Рейнольдса $Re = \omega R^2/\nu_L$.

Центробежная сила толкает нижнюю жидкость (L, водный раствор глицерина) от оси к периферии у дна, создавая меридиональную циркуляцию, и приводит в движение среднюю жидкость (M, подсолнечное масло) и верхнюю жидкость (U, спиртовой раствор глицерина). При определенных условиях с усилением вращения на обеих поверхностях раздела (LM и MU) возникают противотоки: движение к (от) оси под (над) границей раздела (см. рис. 1(б)). При небольшой толщине слоя средней жидкости в нем возникает зона стагнации меридиональной циркуляции, где осевая и радиальная компоненты скорости равны нулю (см. рис. 1(в)). С уменьшением толщины слоя, зона стагнации расширяется и занимает почти весь объем средней жидкости.

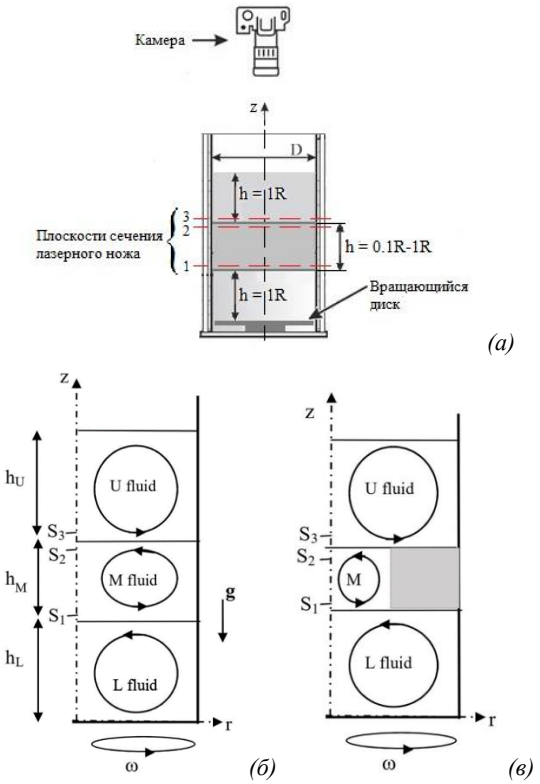


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (а), схема течения при Re = 150 (б) и схема течения с застойной зоной при Re = 180 и h_M = 0,4R (в).

Список литературы:

1. Liow K.Y.S. et al. CFD modeling of the steady-state momentum and oxygen transport in a bioreactor that is driven by an aerial rotating disk //Modern Physics Letters B. 2009. Vol. 23(02). 121-127.
2. Sharifullin B. R. et al. Intense vortex motion in a two-phase bioreactor //Water. 2022. Vol. 15(1). 94.
3. Lo Jacono D., Nazarinia M., Brøns M. Experimental vortex breakdown topology in a cylinder with a free surface //Physics of fluids. 2009. Vol. 21. 111704.
4. Naumov I. V. et al. Changing interface conditions in a two-fluid rotating flow //Physics of Fluids. 2023. Vol. 35. 031705.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 24-19-00233

УДК 532.51

УСТОЙЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В КАНАЛЕ С ВОЛНИСТЫМИ СТЕНКАМИ

Трифонов Ю.Я.

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

630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Течение в каналах с гофрированными стенками встречается во многих областях современной техники (см., например, обзоры в [1, 3]). Топливные элементы, компактные теплообменники, устройства охлаждения компонентов микроэлектроники являются примерами таких областей. Изменение волнистости стенок является одним из методов управления одно- и двухфазными течениями в гофрированных каналах. В какой степени можно затянуть или ускорить переход к более сложным режимам течения при варьивании параметров и формы гофрирования? Для решения такой задачи рассматривается вязкое течение жидкости между двумя волнистыми горизонтальными поверхностями. Используя полные уравнения

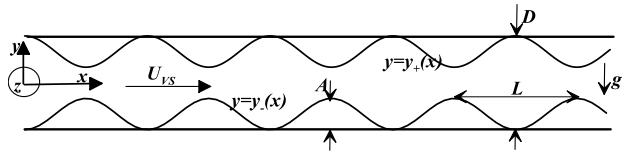


Рис.1. Схема течения, D – высота канала.

Навье-Стокса, рассмотрена линейная устойчивость такого течения относительно различных трехмерных возмущений. На первом этапе находится основное решение и производится линеаризация исходных уравнений в окрестности этого решения. На втором этапе решается обобщенная задача на собственные значения и анализируется весь возможный спектр возмущений. Изучено два типа волнистости стенок - (1) продольное и (2) поперечное периодическое гофрирование. Варьируются число Рейнольдса (Re), амплитуда (*A*), период (*L*) и форма гофрирования. Возмущения полей скорости и давления в общем случае имеют два волновых числа, которые являются дополнительными параметрами. Основное исследование посвящено влиянию волнистости стенок на начало ламинарно-турбулентного перехода.

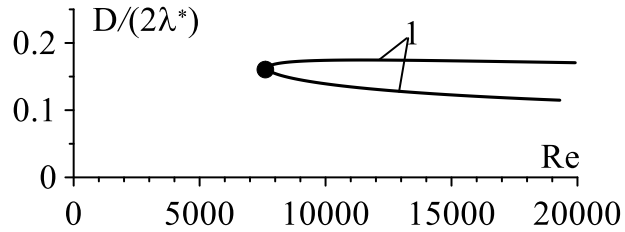


Рис.2. Течение в канале с гладкими стенками. Линии 1 ограничивают область параметров, где двумерные периодические возмущения с длиной волны λ неустойчивы* [4].

В случае продольного гофрирования найдены параметры, при которых основное стационарное течение неустойчиво к плоским периодическим возмущениям и переходит в режим с более сложным поведением во времени (рис.3). При малых значениях амплитуды гофрирования области таких параметров *(D/(2L)*, Re*)* для каналов различной формы близки друг к другу. Они представляют собой "формальное объединение" области неустойчивости гладкого канала *(D/(2λ*)*, Re*)* и "областей неустойчивых субгармоник" *(D/(4λ*)*, Re*)*, *(D/(6λ*)*, Re*)*, *(D/(8λ*)*, Re*)*. Здесь *λ*(*Re*)* - длина волны нейтрального возмущения при течении Пуазейля в гладком канале (рис.2). При увеличении амплитуды гофрирования "формальное объединение" трансформируется в одну область. Форма и амплитуда гофрирования как количественно, так и качественно влияют на эту трансформацию. В случае продольного гофрирования исследована, также, устойчивость к более общим плоским возмущениям с конечным значением параметра Флоке и к пространственным возмущениям.

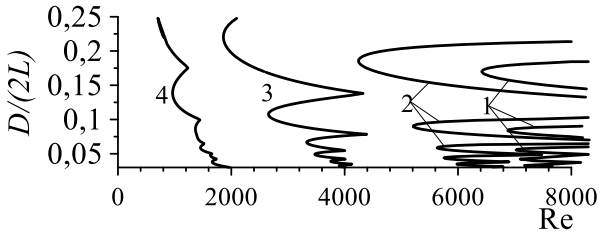


Рис. 3. Течение в канале с синусоидальными стенками, 1 – 2A/D=0.05, 2 – 2A/D=0.1, 3 – 2A/D=0.2, 4 – 2A/D=0.4. Линии 1-4 разделяют значения числа Рейнольдса для которых течение в канале с параметрами гофрирования (A, L) устойчиво (слева от линий) или неустойчиво (справа от линий) относительно плоских периодических возмущений.

В случае поперечного гофрирования найдено, что основное стационарное течение устойчиво к плоским как периодическим, так и двухпериодическим (конечное значение параметра Флоке) возмущениям при всех рассмотренных формах и параметрах гофрирования, вплоть до самых больших значений числа Рейнольдса. Проанализирована устойчивость к пространственным возмущениям для каждого из значений *A/L*, рассмотренных в статье. Обнаружены две области параметра *2A/D*, где зависимости критического числа Рейнольдса качественно различны.

Список литературы

1. Устойчивость течения жидкости над оребренной поверхностью / А.В. Бойко, Н.В. Клюшнев, Ю.М. Нечепуренко; М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2016. 123 с.
2. Trifonov Y.Y. Stability of a viscous liquid film flowing down a periodic surface // Int. J. Multiphase Flow. 2007. V. 33, P. 1186-1204.
3. Trifonov Y.Y. Modeling of mixture separation in column with structured packing // Multiphase Science and Technology. 2022. V. 34, P. 23-51.
4. Orszag S.A. Accurate solution of the Orr-Sommerfeld Stability Equation // J. Fluid Mech. 1971. V. 50. P. 689-703.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00507.

УДК 004.94, 533.6.01

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПОГРУЖЕННОЙ ПЛАСТИНЫ В РАЗВИТОМ СВОБОДНО КОНВЕКТИВНОМ СЛОЕ ПРИ РАДИАЦИОННОМ НАГРЕВЕ ДНА

Филимонов С.А.[1], Гаврилов А.А.[1], Литвинцев К.Ю.[1]

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

В работе представлено моделирование движения пластины в закрытом объеме (кювете) прямоугольной формы, заполненной водой. Размеры кюветы и пластины соответствуют одному из вариантов из работы [1]. Плотность поплавка $\rho = 1200\ {}^{кг}/_{м^3}$. Задача решается в плоской постановке, на торцевых стенках для всех величин задано условия симметрии. У пластины одна степень свободы – вдоль горизонтальной оси X. На верхней стенке задано фиксированное значение температуры – 290,15К. На нижнею стенку подается постоянный тепловой поток, имитирующий радиационный нагрев поверхности – 3 Вт. Выбрано два варианта для моделирования теплообмена на нижней стенке: а) стенка как граничная поверхность расчётной области, б) в расчётную область добавлена плита текстолита ненулевой толщины (Ср = 1300 Вт/(кг*К), λ = 0,38 Вт/(м*К)) и решается задача сопряжённого теплообмена. Оба варианта представлены на рис. 1. В варианте с текстолитом тепловой поток задавался в верхние ячейки расчётной сетки, покрывающей плиту текстолита. На нижней грани плиты задавалось условие нулевого теплового потока. Моделирование твёрдых тел в расчетной области – пластины и текстолита – выполнено методом погруженных границ [2]

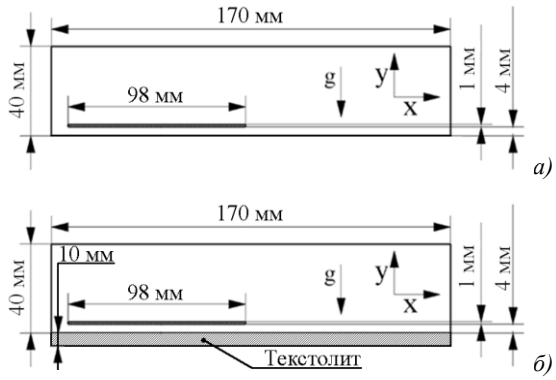


Рис. 1 Геометрия задачи: а) без текстолита, б) с текстолитом

Профиль теплового потока, падающий на дно кюветы получен путем расчёта распределения падающего радиационного теплового потока (коэффициент зеркального отражения у боковых стенок равен 10%). Результирующий безразмерный профиль теплового потока представлен на рис 2.

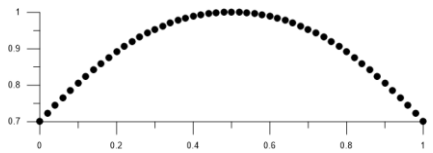


Рис.2 Безразмерный приведенный профиль радиационного теплового потока, падающего на дно кюветы.

Пластина выполнена в трех вариантах: пластина со светоотражающей поверхностью (суммарное тепло поступающее в систему меньше чем задается), пластина с поглощающей свет поверхностью (поплавок так же нагревается) и прозрачная пластина. В вариантах с непрозрачной пластиной она затеняет нагреваемую поверхность – под ней на твёрдой нижней стенке тепловой поток задается равным нулю.

Результаты расчета показали качественное совпадение с результатами экспериментальных исследований [3]. В случае прозрачной пластины и пластины с поглощающей поверхностью через некоторое время пластина останавливается у стенки кюветы и практически не двигается, в независимости от наличия или отсутствия в расчётной области пластины текстолита. В случае с зеркальной пластиной она совершает периодические колебания, под действием конвективных потоков жидкости. Плита текстолита при этом является инерционным фактором, который сглаживает распределение теплового потока от нижней стенки к жидкости, что приводит к более плавному движению пластины.

Достижение количественных совпадений результатов расчёта и эксперимента и проведение систематических расчётов является темой дальнейших исследований.

Исследование движения погруженной пластины с радиационным нагревом выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-61-00098. https://rscf.ru/project/22-61-00098

Разработка математической модели переноса радиационного излучения выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН 124062400029-2.

Список литературы:

1. Frick P. et al. Rayleigh–Bénard convection with an immersed floating body // J. Fluid Mech. 2024. Vol. 979. P. A23.
2. Mittal R., Iaccarino G. IMMERSED BOUNDARY METHODS // Annu. Rev. Fluid Mech. 2005. Vol. 37, № 1. P. 239–261.
3. Vasiliev A.Y. et al. Drift of a Free-floating Body in a Convective Layer Heated by Radiation // Журнал Сибирского федерального университета. Математика и физика. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего~…, 2023. Vol. 16, № 5. P. 562–571.

УДК 532.5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ В ЖИДКОСТИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

Шарифуллин Б.Р.[1,2], Наумов И.В.[1,2]

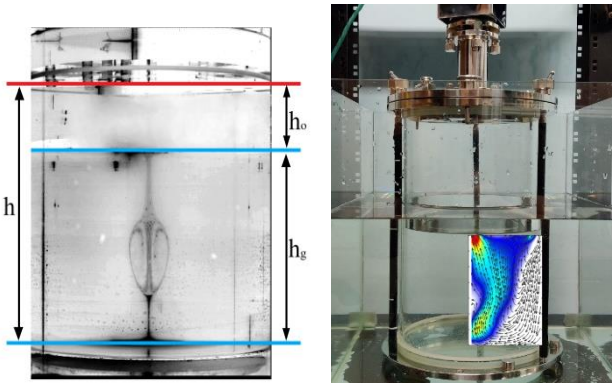
[1]Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2]Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Исследование формирования вихревых структур для улучшения тепло-массообменных процессов в биологических и энергетических технологиях является важнейшим приложением в разработке вихревых аппаратов и оптимизации рабочих режимов [1]. Во многих вихревых аппаратах существует взаимодействие вращающейся рабочей жидкости с другой жидкостью или газом [2-4]. Успешное применение газовихревых биореакторов для выращивания клеточных культур и тканей [2] привлекло внимание исследователей к динамике двухфазных течений, то есть к исследованию формирования вихревого движения при взаимодействии различных жидких и газообразных сред [3-5], отличающихся как по плотности, так и по вязкости. В этих течениях вихревое движение одной жидкости генерируется через промежуточную жидкую или газообразную среду вращением одного из торцевых дисков [6-8].

В данной работе выполнено экспериментальное исследование формирования структуры ограниченного вихревого течения жидкости, закрученного потоком другой жидкости или газовым вихрем. Выполнено сравнение полученных результатов со структурами, возникающими в закрытых цилиндрических вихревых реакторах, где движение в рабочем объеме формируется вращающимся торцевым диском.

Исследования гидродинамической структуры в системе двух несмешиваемых жидкостей проводились в вертикальном цилиндрическом контейнере (радиус R= 45 мм) с верхним диском, вращающимся с угловой скоростью ω (см. рис. 1(а)), а исследования структуры в системе газ-жидкость – в цилиндрическом контейнере (радиус R = 95 мм) с лопаточным колесом, установленным в крышку (см. рис. 1(б)). В качестве рабочей жидкости использовался 65% раствор глицерин-вода (плотность ρ_g = 1150 кг/м^3, кинематическая вязкость ν_g = 15 мм^2/с). В качестве второй жидкости использовалось подсолнечное масло (ρ_o=916 кг/м^3, ν_o= 41.9 мм^2/с). Число Рейнольдса Re = $\omega R^2/\nu_g$ варьировалась от 200 до 1000. Исследования проводились при помощи метода PIV и визуализации в вертикальном сечении, проходящем через ось цилиндра и в горизонтальном сечении под границей, раздела на расстоянии 1 мм. Поток жидкости засеивался полиамидными частицами плотностью 1030 кг/м^3 и средним размером 10 мкм.

В ходе работ были выявлены закономерности формирования циркуляционных вихревых ячеек в жидкости. Наблюдается подобие структуры течения в рабочей жидкости, независимо от способа создания закрутки (твердый диск, жидкий промежуточный слой, воздушный вихрь). Получено, что, несмотря на наличие промежуточной жидкой или газовой среды, в рабочей жидкости может формироваться распад вихря (см. рис. 1), как и в случае закрутки твердым диском. Показано, что распад вихря является индикатором режима течения, а сравнивая с известными работами по распадам вихря в цилиндрическом контейнере можно определять режим течения для дальнейшего практического применения двухжидкостных и/или двухфазных течений в вихревых реакторных установках.



(а) *(б)*

Рис. 1. Распад вихря в системе двух несмешиваемых жидкостей (а) и в системе газ-жидкость (б).

Список литературы:

1. Shtern V. Cellular Flows. Topological Metamorphoses in Fluid Mechanics // New York: Cambridge University Press. 2018. 584 p.
2. Мертвецов Н., Рамазанов Ю., Репков А., Дударев А.Н., Кислых В. Газовихревые биореакторы "Биок": Использование в современной биотехнологии // Новосибирск: Новосибирское отделение издательства "Наука", 2002. 118 с.
3. Наумов И.В., Геворгиз Р.Г., Скрипкин С.Г., Шарифуллин Б.Р. Экспериментальное исследование формирования вихревой структуры в газовихревом биореакторе // Теплофизика и аэромеханика. 2022. Т. 29, № 5. С. 719-724.
4. Sharifullin B.R., Skripkin S.G., Naumov I.V. et al. Intense Vortex Motion in a Two-Phase Bioreactor // Water. 2022. Vol. 15(1), 94.
5. Chaplina T.O. Experimental study of substance transfer in vortex and wave flows in multicomponent media // In Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes (2018). Springer, Cham. 2019. pp. 159-173.
6. Naumov I.V., Sharifullin B.R., Tsoy M.A., Shtern V.N. Dual vortex breakdown in a two-fluid confined flow // Physics of Fluids, 2020. V. 32(6), p. 061706.
7. Skripkin S.G., Sharifullin B.R., Naumov I.V., Shtern V.N. Dual vortex breakdown in a two-fluid whirlpool // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. 23085.
8. Naumov I.V., Skripkin S.G., Kvon, A.Z., Shtern V.N. Changing interface conditions in a two-fluid rotating flow // Physics of Fluids, 2023. V.35(3), p. 031705.

УДК 532.516

О РОЛИ СКРЫТОГО ИНТЕГРАЛА ДВИЖЕНИЯ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ВОЗВРАТНОГО ТЕЧЕНИЯ В НЕАВТОМОДЕЛЬНОЙ ЗАКРУЧЕННОЙ СТРУЕ

Яворский Н.И.[1]

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

В работе представлены точные решения уравнений Навье-Стокса, описывающие дальнее поле течения для затопленной закрученной неавтомодельной струи. Главные члены разложения полного решения в бесконечно удаленной точке определяются точными интегралами движения: сохранением полного потока импульса, полного потока момента импульса, полного потока массы и скрытым интегралом движения. Раскрывается физический смысл скрытого интеграла движения. Показано, что для описания такой неавтомодельной струи существенно, что источник движения имеет ненулевой характерный размер, а появление скрытого интеграла сохранения связано с тем, что координаты точки эффективного источника импульса и точки эффективного источника массы могут не совпадать для реальных протяжённых в пространстве источников струйного течения. В этом случае возникает момент силы, который можно получить векторным умножением вектора смещения точки источника импульса на вектор величины полного потока импульса (силы). При этом компонента вектора пространственного смещения вдоль вектора полного потока импульса естественно не дает вклада в момент силы. Тем не менее, смещение точки приложения силы вдоль нее самой рождает в жидкости дополнительное движение с интенсивностью, пропорциональной этому смещению. Дополнительное движение в свою очередь рождает дополнительную эжекцию струи. Эту величину можно определить, вычислив дополнительный расход жидкости интегрированием по плоскости, перпендикулярной вектору полного потока импульса, который оказывается пропорциональным компоненте вектора пространственного смещения источника импульса вдоль вектора полного потока импульса. Фактически, это дополнительный расход, который вызван появлением струйного диполя.

В работе показывается, что аналитические решения для дальнего поля неосесимметричной струи, полученное в работе [1], для течения с заданным произвольно направленным в пространстве векторным интегралом движения – полным потоком момента количества движения, можно получить не решая уравнения Навье-Стокса, а применяя оператор сдвига на вектор смещения точки приложения сила на автомодельное решение Л.Д. Ландау для затопленной струи [2]. При этом и выяснилось, что скрытый интеграл движения связан с наличием компоненты вектора смещения вдоль вектора силы, равной полному потоку импульса от источника струи.

Решение указанной выше задачи о неавтомодельной затопленной струе, определяемой точными интегралами движения, оказалось возможным получить в аналитическом виде с использованием специальной функции полилогарифм.

Применяя полученное аналитическое решение для закрученной струи было обнаружено влияние расположения точки приложения вектора силы на размер зоны обратного течения, возникающее в струе при наличии закрутки. Интенсивность закрутки определяется компонентой полного потока момента количества движения, параллельной вектору силы, рождающей затопленную струю. В то же время воздействие струйного диполя на зону возвратного течения оказалось весьма существенно, хотя такой диполь направлен вдоль вектора полного потока импульса и не дает никакого вклада в закрутку течения.

Проведены численные расчёты течения в закрученной струе при различных значениях числа Рейнольдса, величины безразмерного вектора сдвига и величины закрутки, определяемой потоком момента импульса. Решение задачи проводилось в рамках стандартной модели неавтомодельной струи, вытекающей из трубка заданного конечного радиуса. В такой задаче расход жидкости из источника струи не является независимым параметром задачи и его величина связана с величиной полного потока импульса. При определенных значениях параметра крутки и величины безразмерного вектора сдвига обнаружено появление зон возвратного течения многократно превышающих характерный размер источника струи. Отдельно рассмотрены режимы, соответствующие значению числа Рейнольдса, описывающего турбулентные струи с постоянной турбулентной вязкостью.

Проведен анализ полученного решения при числах Рейнольдса $\mathrm{Re} \to \infty$. Проведено сравнение в этом пределе решений полных уравнений Навье-Стокса с известными решениями, полученными в рамках теории пограничного слоя. Показано, что решение, соответствующее струйному диполю, которое имеет нулевой расход, переходит в решение Л.Г. Лойцянского [3], которое было им интерпретировано как решение, описывающее струйное течение с ненулевым расходом. Таким образом, показано, что скрытый интеграл движения был впервые получен Л.Г. Лойцянский в 1953 году, но неверно интерпретирован.

Работа поддержана бюджетным проектом № FWNS-2021-0009.

Список литературы:

1. Мулляджанов Р.И., Яворский Н.И. Решение задачи об истечении неосесимметричной закрученной затопленной струи // ПМТФ. 2013. Т. 54, №2. С. 46-51.
2. Ландау Л.Д. Об одном новом точном решении уравнений Навье-Стокса // Доклады АН СССР. 1944. Т.43, №7. С. 299-301.
3. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003. 840 с.

Секция 4 Методы управления турбулентностью и интенсификация тепломассопереноса

УДК 536.24

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА В ОРЕБРЕННОМ КАНАЛЕ ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ ПОЛОЖЕНИЯ И РАЗМЕРА РЕБРА

Барсуков А.В., Терехов В.В., Терехов В.И.

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

Отрывные турбулентные течения являются одними из самых распространенных явлений в гидродинамике. Они возникают при обтекании вихрегенераторов различных форм в виде ступенек [1], ребер[2] и т.д. Изучение отрывных течений является важной задачей во многих областях науки и техники и работы данного направления имеют важное практическое значение в энергетике. Такие течения реализуются во многих технологических устройствах, таких как теплообменное оборудование, элементы авиационно-космических аппаратов, вентиляционные системы, и т.п. Исследование отрывных течений позволяет оптимизировать геометрию и повысить теплогидравлические показатели этих устройств.

Была проведена серия расчетов, в которой варьируемым параметром была высота ребер (d/H = 0.13 ÷ 0.66) и число Рейнольдса Re = 5 000 ÷ 20 000, где H – ширина канала, w/H = 2 (рис 1). Получены данные о динамике и теплообмене турбулентного течения в плоском канале при наличии периодических ребер. Расстояние между ребрами было выбрано таким образом, что оно было фиксированным и оптимальным с точки зрения теплообмена для ребра с d/H = 0.2 (w/H = 2).

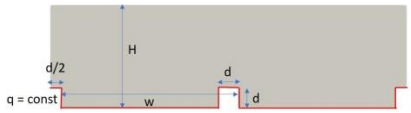


Рисунок 1. Схема расчетной области

Была получена зависимость среднего по поверхности числа Нуссельта от высоты ребер и числа Рейнольдса (рис 2а). Из рисунка видно, что при увеличении высоты ребра среднее по поверхности число Нуссельта так же становится больше. При этом увеличение числа Рейнольдса так же приводит к интенсификации теплообмена. На рисунке 2б показано отношение среднего по поверхности числа Нуссельта в случае плоского канала с оребрением к числу Нуссельта в плоском канале. Из графика видно, что отношение чисел Нуссельта увеличивается с увеличением высоты ребра, при этом влияние числа Рейнольдса весьма небольшое.

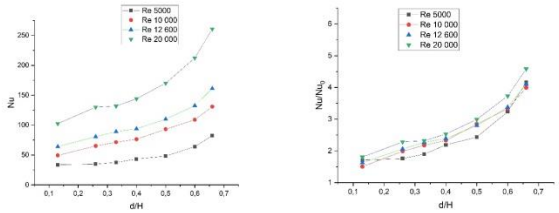


Рисунок 2. Зависимость а) среднего по поверхности числа Нуссельта, б) отношения Nu/Nu_0, где Nu_0 – среднее по поверхности число Нуссельта в плоском канале, w/H = 2

Таким образом, было показано, что при увеличении высоты ребра интенсивность теплообмена возрастает. Усиление теплопередачи в ребристом канале сопровождается увеличением перепада давления. Оптимальный коэффициент теплопередачи соответствует наибольшему коэффициенту трения, а минимальный коэффициент теплопередачи соответствует наименьшему коэффициенту трения.

Результаты численных расчетов получены в рамках Государственного задания ИТ СО РАН (121031800217-8)

Список литературы:

1. Rashidi S., Hormozi F., Sundén B., Mahian O. Energy saving in thermal energy systems using dimpled surface technology — A review on mechanisms and applications // Applied Energy. 2019. V. 250, pp. 1491–1547.
2. Zheng S.-F., Liu G.-Q., Lian W.-K., Yang Y.-R., Gao S.-R., Sunden B., Wang X.-D. Fluid flow and heat transfer in a rectangular ribbed channel with a hierarchical design for turbine blade internal cooling // Applied Thermal Engineering. 2022. V.127. 119183

УДК 532.527.2

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА ЗА ОДИНОЧНЫМ РЕБРОМ В КОЛЬЦЕВОМ ЗАЗОРЕ С ВНУТРЕННИМ ВРАЩАЮЩИМСЯ ЦИЛИНДРОМ.

Богатко Т.В., Терехов В.В., Терехов В.И.

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

Изучение течения и теплообмена в круговой системе Тейлора – Куэтта между вращающимися цилиндрами представляет большой научный и практический интерес. Интенсивно ведутся поиски новых методов прямого преобразования механической энергии в теплоту [1] в мультицилиндровых генераторах [2], а также способов интенсификации выработки тепловой энергии [3,4]. В работе представлены результаты численного исследования течения жидкости и теплообмена в кольцевом зазоре между двумя цилиндрами при наличии ребра на одной из стенок.

Постановка задачи двумерная. Течение ламинарное. Число Рейнольдса изменялось в диапазоне от 70 до 700. Движение вязкой жидкости осуществлялось за счёт вращения внутреннего цилиндра, внешний при этом оставался неподвижным. Интенсификация теплообмена происходила за счёт установки плоского ребра на стенке внешнего цилиндра перпендикулярно вращательному движению.

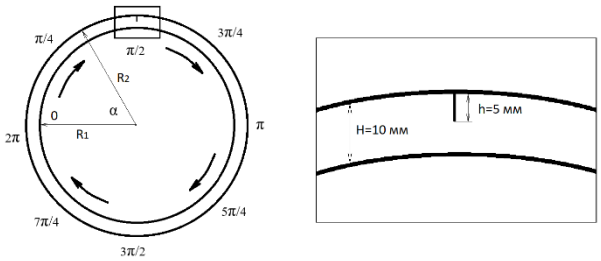


Рис.1. Схема расчётной области.

На рисунке 1 схематически представлена расчётная область. Диаметры внутреннего и внешнего цилиндров равны D1=174 мм и D2=194 мм. Соответственно высота кольцевого зазора H=10 мм. Высота ребра h = 5 мм. Угловые скорости вращения внутреннего цилиндра равнялись w = 10, 50, 100 рад/сек. Жидкость – глицерин. Температура внешней стенки и ребра 293K, внутренней стенки 313K.

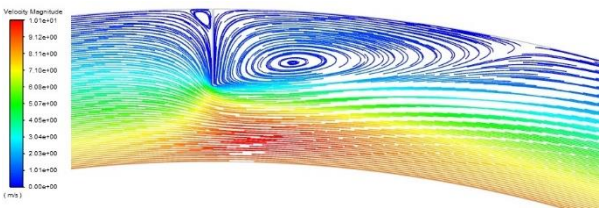


Рис.2. Картина вихревого течения за ребром.

На рисунке 2 представлена картина течения в области ребра при скорости вращения w=100 рад/сек. Непосредственно за ребром наблюдается зона возвратных течений, протяженностью от 1 до 4 высот ребра. Размер рециркуляционной области увеличивается с ростом скорости вращения внутреннего цилиндра.

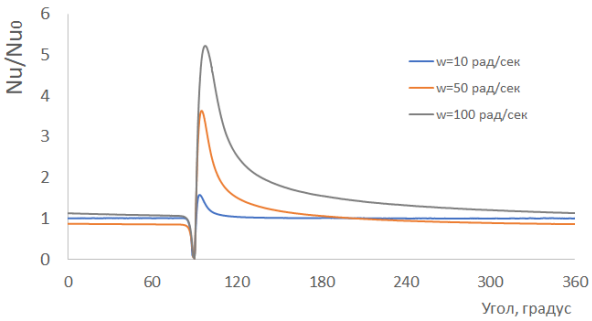


Рис.3. Изменение параметра интенсификации теплообмена по образующей внешнего цилиндра.

Именно в этой области происходит значительная интенсификация теплообмена, как это показано на рисунке 3. Значения Nu_0 соответствуют случаю для вращательного движения без преграды. Наблюдается рост теплоотдачи до 5.5 раз, по сравнению с гладким кольцевым зазором.

Данное исследование является начальным этапом для большого раздела инженерной области, связанной с разработкой и проектированием ветрогенераторов тепловой энергии. Полученные данные показывают перспективы дальнейших исследований, которые будут включать в себя вариацию высоты ребра, системы из нескольких рёбер, трёхмерное моделирование с продольным потоком вязкой жидкости между двумя вращающимися цилиндрами.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, грант 24-19-00358.

Список литературы:

1. Сон Э.Е., Ганага С.В., Николаев В.Г., Кудряшов Ю.И. К выбору оптимальных конструктивных схем и параметров ветроэнергетических установок для российской Арктики // Известия РАН. Энергетика. 2020. № 3. С. 33–59.
2. Serov A.F., Nazarov A.D., Mamonov V.N., Terekhov V.I. Experimental investigation of energy dissipation in the multi-cylinder Couette-Taylor system with independently rotating cylinders//Applied Energy// 2019, V. 251, 113362
3. Мамонов В.Н., Миськив Н.Б., Назаров А.Д., Серов А.Ф., Терехов В.И. Влияние оребрения внутреннего вращающегося цилиндра в системе Куэтта–Тейлора на величину момента сопротивления// Т и А, 2023, том 30, № 4, с. 675-686.
4. Jeng T.-M., Tzeng S.-C., Lin C.-H. Heat transfer enhancement of Taylor–Couettee–Poiseuille flow in an annulus by mounting longitudinal ribs on the rotating inner cylinder // Int. J. Heat Mass Transfer. 2007. Vol. 50, No. 1–2. P. 381–390.

УДК 532.517

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ СТРУЙНЫМ ТЕЧЕНИЕМ С ПОМОЩЬЮ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Ванькова О.С., Яковенко С.Н.

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

Представлены результаты численных экспериментов в струе, истекающей со скоростью U из отверстия диаметром D с центром $x = y = z = 0$ в затопленное пространство при числе Рейнольдса Re (= UD/ν) ≤ 500 и воздействии акустического поля с колебанием скорости $v' = A \times \sin(2\pi f \cdot t)$ различной амплитуды A, частоты f, с числом Струхаля 0,01 ≤ St (= $f\ D/U$) ≤ 0,5. По данным предыдущих работ [1-4], активные методы управления потоком с помощью акустических возмущений приводят к эффектам расщепления струи в широких диапазонах частот и амплитуд воздействия.

Численные решения уравнений Навье–Стокса получены при помощи метода конечных объемов. Размеры расчетной области ($35D \times 6D \times 20D$) и число узлов в направлениях x-y-z выбраны с учетом результатов предшествующих исследований [3-6].

Верификация методики расчета при амплитуде колебаний скорости V_0/U = 0,16% в точке x = 2,5D на оси $y = z = 0$ показывает сходимость к независимому от разрешения сетки решения (рис. 1) при фиксированных значениях шага $\Delta t = 0.05D/U$, периода установления $t_0 = 1000D/U$, интервала осреднения $T = 500D/U$. Эти значения оптимальны согласно дополнительным численным экспериментам, где решения слабо менялись при уменьшении Δt и увеличении t_0, $T = t_1 - t_0$.

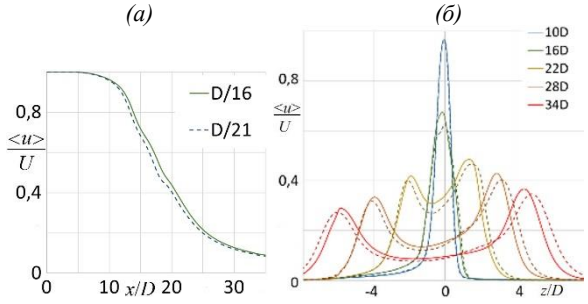


Рис. 1. Изучение сеточной сходимости в расчетах на двух неравномерных сетках с минимальным линейным размером ячеек D/16 и D/21 (Re = 500, St = 0,1, V_0 = 0,0016U, A = 0,1U, один источник возмущения при x ≤ 5D, |y| ≤ 3D, z = 10D): осредненная по интервалу 1000 ≤ tU/D ≤ 1500 продольная скорость <u>, y = z = 0 (а), y=0, x/D = 10, 16, 22, 28, 34 (б).

Исследования проведены с источником на боковой границе при $z = 10D$, с двумя источниками на противоположных боковых границах при $z = -10D$ и $10D$, а также с продольными колебаниями скорости на входе частотой $2f$. На рис. 2 приведены средняя скорость в поперечных сечениях (а) и на оси (б), толщина струи (в), изолинии скорости в плоскости бифуркации (г, д) для одного и двух источников звука. Как видно на графиках, при переходе от одного к двум источникам немного возрастает угол бифуркации струи, при этом картина расщепления становится симметричной.

При поиске оптимальных параметров в исследованиях для различных амплитуд возмущения V_0/U < 2% и чисел Струхаля St выявлено [4], что расщепление струи происходит при 0,02 < St < 0,12, максимум α составляет 38° при St = 0,07 и V_0/U = 0,01. Угол α оценен по характерной ширине $d(x)$, определяемой из отклонений по z от оси точек, где скорость <u> в верхней и нижней ветвях расщепляющейся струи максимальна (рис. 2, *а*, *в*). При V_0/U < 0,3% бифуркация отсутствует.

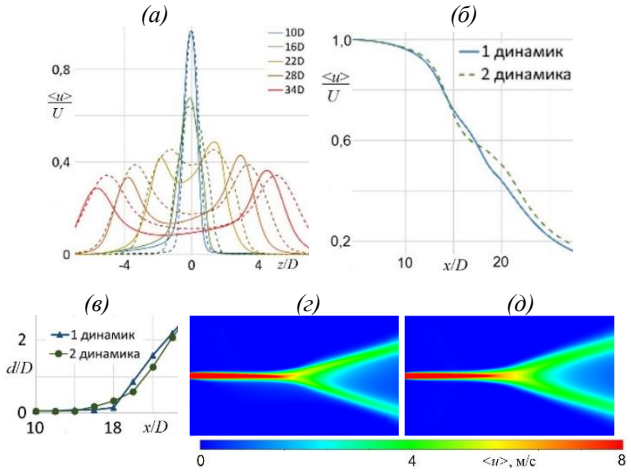


Рис. 2. Влияние числа «динамиков» для Re = 500, St = A/U = 0,1 на величины <u>, y=z=0 (а), y=0, x/D = 10, 16, 22, 28, 34 (б), d(x,y=0) (в); <u>(x,z,y=0) с одним (г) и двумя (д) источниками.

Изучение влияния параметров Re, St, a, числа и положения источников возмущений открывает возможности оптимального управления потоком, турбулентностью, тепломассопереносом в струйных течениях, что применимо в задачах энергетики и транспорта.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00310, https://rscf.ru/project/23-27-00310/.

Список литературы:

6. Reynolds W., Parekh D., Juvet P., Lee M. Bifurcating and blooming jets // Annu. Rev. Fluid Mech. 2003. Vol. 35. P. 295-315.
1. Козлов В.В., Грек Г.Р., Литвиненко Ю.А., Козлов Г.В., Литвиненко М.В. Дозвуковые круглая и плоская макро- и микроструи в поперечном акустическом поле // Вест. НГУ. Серия: Физика. 2010. Т. 5, вып. 2. С. 28–42.
2. Шевченко А.К., Яковенко С.Н. Численное исследование методов управления потоком и эффектов расщепления в круглой затопленной струе // Теплофиз. аэромех. 2021. Т. 28. С. 379-395.
3. Vankova O.S., Yakovenko S.N. Numerical simulations of a subsonic round jet with transverse acoustic and mechanical forcing // E3S Web Conf. 2023. Vol. 459. 03002. P. 1-6.
4. Gohil T.B., Saha A.K., Muralidhar K. Simulation of the blooming phenomenon in forced circular jets // J. Fluid Mech. 2015. Vol. 783. P. 567–604.
5. Tyliszczak A., Geurts B.J. Parametric analysis of excited round jets – Numerical study // Flow, Turbul. Combust. 2014. Vol. 93. P. 221-247.

УДК 532.517.4: 532.135

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО СПИРАЛЬНОГО ТЕЧЕНИЯ НЕНЬЮТОНОВСКОЙ СТЕПЕННОЙ ЖИДКОСТИ В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ ПРИ УМЕРЕННОМ ЧИСЛЕ РЕЙНОЛЬДСА

Гаврилов А.А.[1], Игнатенко Я.С.[2]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] Celle Technology Center of Baker Hughes,
29221, Germany, Celle, Baker Hughes str, 1

Течение жидкости в кольцевом канале широко распространено в технике и имеет различные применения. Несмотря на геометрическую простоту кольцевой поток с вращением внутренней цилиндрической стенки имеет сложное закрученное течение, трехмерный пограничный слой и усиление турбулентности. Во многих приложениях технологическая жидкость часто обладает неньютоновскими реологические характеристиками, что существенно расширяют диапазон встречающихся режимов течения и усложняет решение гидродинамической задачи.

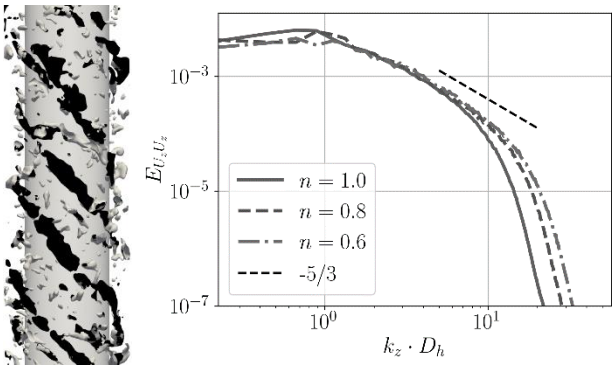
В работе численно исследуется течение в кольцевом канале с вращением внутреннего цилиндра жидкости со степенным реологическим законом при аксиальном числе Re = 10,000. Отношение радиуса внешнего цилиндра к внутреннему равно 2. Для моделирования выбрано три жидкости с разными значениями показателя степени жидкости n = 1.0 (ньютоновская), 0.8 и 0.6. Вращение внутреннего цилиндра задаётся безразмерным кинематическим параметром N, равным отношению линейной скорости вращения на поверхности цилиндра к среднеобъемной аксиальной скорости. Для каждой жидкости рассмотрено четыре режима спирального течения N = 0, 0.2, 0.5 и 1.0.

Моделирование выполняется в рамках подхода модели крупных вихрей. В качестве модели для замыкания подсеточных напряжений используется динамическая модель Германо—Лилли. Моделирование выполнено для участка канала в периодической вдоль течения постановке. Результаты верификации численного метода и валидации решения для ньютоновской жидкости содержится в статье [1].

Результаты моделирования

Спиральные турбулентные течения с вращением внутреннего цилиндра характеризуются формированием крупномасштабных спиралеобразных вихрей типа Тейлора-Гёртлера. Вихри формируются из-за выброса жидкости от поверхности вращающегося цилиндра под действием центробежной силы. Общий характер течения сохраняется и для степенной жидкости, но с существенной перестройкой наблюдающихся слоёв течения.

В результате сбора статистики получены радиальные распределения первых и вторых моментов скорости жидкости. Показано, что анизотропия турбулентных пульсаций скорости в пристеночном слое увеличивается при уменьшении степени жидкости n, и уменьшается при увеличении параметра вращения N.



(а) (б)

Рис.1. (а) Вихревые структуры для n = 1.0 и N = 1 ($\lambda_2 = -0.5$ с$^{-2}$); (б) спектр аксиальной скорости для N = 1 на расстоянии от стенки y+ = 100.

Использование вихреразрешающего моделирования позволяет получить детальную статистическую информацию о флуктуирующей вязкости и её корреляций с кинематическими параметрами течения. Предложены новые замыкания для осреднённой кажущейся вязкости и неньютоновского турбулентного тензора. Показано хорошее согласование аппроксимаций с результатами моделирования.

Выполнен анализ пространственных и временных спектров компонент скорости в поперечно и продольном сечениях канала. Интенсивность пульсаций растёт с увеличением скорости вращения N, но наблюдается накачка энергией низкочастотных пульсаций, максимум спектра смещается в низкочастотную часть спектра. Формируются крупномасштабные когерентные вихри, обнаруживаемые на дополнительно отфильтрованной по пространству мгновенной картине течения (см. рис. 1а).

С уменьшением степени n в узкой пристеночной области уширяется спектр пульсаций (увеличение локального числа Рейнольдса) и подавляются низкочастотные пульсаций (см. рис. 1б). Однако вдали от стенки, наблюдается сужение спектра пульсаций с уменьшение интенсивности, связанное с увеличением кажущейся вязкости.

Список литературы

1. Gavrilov, A. and Ignatenko, Y. Numerical Simulation of Taylor—Couette—Poiseuille Flow at Re = 10,000. Fluids 2023, 8, 280. https://doi.org/10.3390/fluids8100280.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН (121031800215-4) и при поддержке Baker Hughes.

УДК 536.244

ФЛУКТУАЦИИ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА В ИМПАКТНЫХ СТРУЯХ

Герасимов А.С.[1], Леманов В.В.[1]
[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

При рассмотрении задач теплообмена в первую очередь интересуют средние значения тепловых параметров (тепловой поток, коэффициент теплоотдачи, числа Нуссельта (Nu), Стентона (St) или Рэлея (Ra)) [1]. В то же время на практике часто наблюдаются флуктуации тепловых процессов, которые могут приводить к существенному отклонению мгновенных значений температуры потоков от их средних значений. В некоторых случаях эти пульсации могут достигать уровней, соизмеримых со средними значениями. В связи с этим даже существует термин “пиковые значения”. В литературе изучению мгновенных экстремальных значений тепловых параметров уделяется недостаточно внимания. Настоящая работа посвящена изучению флуктуации теплового потока в импактных струях.

Рассмотрено два варианта натекания газовых струй под углом 90º к плоской поверхности. Первый вариант – это стационарная струя, второй вариант – синтетическая струя. Характерной особенностью второго случая является ее нестационарный характер, а также, “нулевой расход” в источнике струи на отдельном интервале времени, так называемая система “вдува-отсоса”. Во втором случае отсутствует баллон со сжатым газом, а рабочим телом является окружающая среда. Стационарные импактные струи находят широкое применение при охлаждении теплонапряженных участков. Синтетические струи встречаются при охлаждении в оптике и микроэлектронике, а также для управления вектором тяги и снижения шума авиационных двигателей [2-5].

Исследования в данной работе выполнены на двух экспериментальных участках. Рабочий газ в струе и окружающая среда - воздух. Опыты проведены при термодинамических параметрах, соответствующих комнатным и атмосферным условиям. Теплообмен осуществлялся между натекающей струей и плоской поверхностью нагреваемого участка (медная пластина диаметром 190 мм и толщиной 50 мм). Температур набегающей струи T_J = 18-20°C, граничное условие на поверхности пластины T_w = const (T_w=45–56°C). Использовались миниатюрные пленочные датчики теплового потока (ДТП) размером 2x2x0.2 мм [6], приклеенные к поверхности пластины и через предварительный усилитель и аналого-цифровой преобразователь подсоединены к компьютеру. Такая схема позволяет измерять мгновенное значение теплового потока в полосе частот до 3 кГц и вычислять по временному ряду (размер выборки $1x10^4$) среднее Q и среднеквадратичное q значение теплового потока.

Стационарная струя формировалась с помощью длинной трубки диаметром d = 3 мм длиной l = 1 м. Расстояние от начала струи до преграды составляло h/d=20. Система генерации синтетической струи включала: генератор электрических импульсов, акустический динамик, пластину с отверстием (d=7 мм, h/d=0.3-5). Для изучения динамических характеристик импактных струй использовался термоанемометр DISA55M и миниатюрный датчик DISA55P11 с вольфрамовой нитью диаметром 5 мкм.

В работе получены данные по актуальным, средним и среднеквадратичным значениям теплового потока для двух вариантов импактных струй. Основное внимание уделено флуктуациям в точке торможения пластины. Для стационарной струи представлены пульсации теплового потока для ламинарного, переходного и турбулентного режима течения в струйном источнике (Re=400-8000). Показано, что максимальные флуктуации теплового потока могут достигать 15% в узком диапазоне чисел Рейнольдса (Re=2000-3500), когда в струйном источнике образуются крупномасштабные турбулентные структуры на режиме перемежаемости [7]. В случае с синтетической струей рассмотрены низкие числа Рейнольдса Re<3500. Показано, что наибольшие флуктуации теплового потока получены при низкочастотной работе генераторов струй (f<500 Гц). Также обнаружен режим с акустическим резонансом, связанным с использованием динамика и его работы на нелинейных режимах генерации синтетической струи.

Опытные данные, полученные в представленной работе, могут быть использованы для валидации моделей расчета тепловых параметров в импактных стационарных и синтетических струях. С точки зрения практики получена оценка экстремальных (пиковых) значений тепловых параметров.

Работа выполнена при частичной поддержке РНФ (№ 23-29-00584).

Список литературы:

1. Анализ подобия в теплофизике / С.С. Кутателадзе; Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1982. 280 с.
2. Теплообмен при взаимодействии струй с преградами / Б.Н. Юдаев, М.С. Михайлов, В.К. Савин; М.: Машиностроение, 1977. 248 с.
3. Glezer A., Amitay M. Synthetic jets // Ann. Rev. Fluid Mech. 2002. V.34: 503–29.
4. Klinkhamer C., Iyer KLV., Etemadi M. Jet Impingement Heat Sinks with Application Towards Power Electronics Cooling: A Review // IEEE Trans. 2023. V.13. № 6. P. 765-787.
5. Lemanov V.V., Pakhomov M.A., Terekhov V.I., Travnicek Z. Non-stationary flow and heat transfer in a synthetic confined jet impingement // Int. J. Thermal Sci. 2022. Vol. 179. Art. 107607.
6. Основы градиентной теплометрии / С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков; СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2003. 203 с.
7. Леманов В.В., Лукашов В.В., Шаров К.А. Переход к турбулентности через перемежаемость в инертных и реагирующих струях // ИЗВЕСТИЯ РАН.: МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗА. 2020. № 6. с. 50–59.

УДК 532.517

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛООТДАЧИ ДЛЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЛЕНОЧНОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ПО ПОВЕРХНОСТИ ТРУБОК КОЛОННЫ СПГ

Гешев П.И.

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

Разработана упрощенная модель коэффициента теплоотдачи в турбулентном пленочном потоке жидкости, стекающей по спиральным трубам колонны СПГ. Учитывается вес жидкости и сила трения, обусловленная потоком пара. Коэффициенты теплоотдачи, рассчитанные по модели, сравниваются с экспериментальными данными, полученными в диссертации Фредхейма. Получено хорошее согласие между расчетными и экспериментальными данными.

Для расчета теплообмена между стенкой трубки и стекающей по ней пленкой сделаем следующие предположения:

1. Пленка жидкости течет по поверхности цилиндрической трубы из верхней точки с углом α =0 в нижнюю точку с углом $\alpha = \pi$ (см. рис.1,а) под действием изменяющейся силы тяжести $\rho g Sin\alpha$, проекция которой на вертикаль равна $\rho g Sin^2\alpha$. Усреднив эту плотность гравитационных сил по поверхности трубки, получим значение среднего вертикального гравитационного ускорения, действующего на жидкость

$$\bar{g} = g\frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} Sin^2\alpha\, d\alpha = \frac{1}{2}g\,. \qquad (1)$$

2. Вместо пленки на поверхности трубки длиной $\pi d_t/2$ будем рассматривать эквивалентную пленку, стекающую по вертикальному отрезку длиной d_t (см. рис.1,б). То есть мы проецируем пленку, стекающую по дуге, на вертикальную плоскость. Исключив из рассмотрения пленку в межтрубном пространстве, где теплообмен отсутствует, мы приходим к модели эквивалентной пленки на *N* трубках как пленки, стекающей по вертикальной поверхности длиной Nd_t.

3. Скорость *u* и температура *T* в вертикально падающей пленке жидкости зависят только от координаты *y* (см. рис. 1,б) и могут быть определены с помощью следующих проинтегрированных уравнений для переноса импульса и тепла:

$$\rho_L\left(\nu_L + \nu_T(y)\right)\frac{du}{dy} = \tau_V + \rho_L\bar{g}\left(\delta - y\right) \qquad (2)$$

$$\left(\lambda_L + \lambda_T(y)\right)\frac{dT}{dy} = -q_W \qquad (3)$$

где ρ_L, ν_L, λ_L - плотность, вязкость и теплопроводность жидкости, ν_T, λ_T - турбулентная вязкость и теплопроводность в пленке. Известно, что для жидкостей с Pr>1 более корректным является значение $\mathrm{Pr}_T = \nu_T / a_T = 0.9$ ($\lambda_T = \rho_L C_p a_T$).

4. Турбулентная вязкость в пристенной турбулентности может быть описана универсальной функцией, которая может быть аппроксимирована следующим выражением [1]

$$\frac{\nu_T(y)}{\nu_L} = \varphi(y_+) = \frac{y_+^3}{2{,}5y_+^2 + 1015} \qquad (4)$$

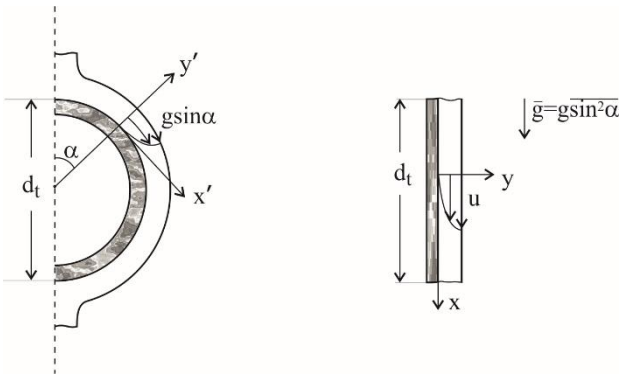


Рис.1. Схема течения а) на поверхности трубы и б) в эквивалентном вертикальном пленочном потоке.

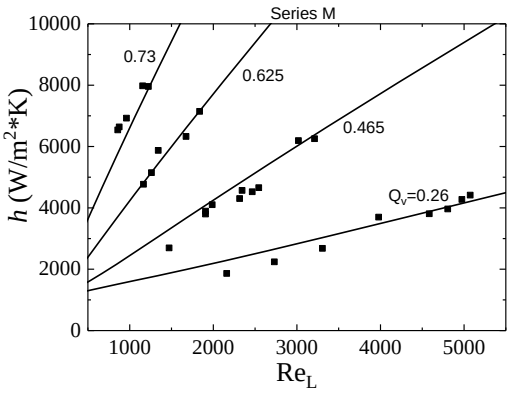


Рис.2. Сравнение расчетных коэффициентов теплоотдачи с экспериментальными данными Фредхайма [2] при фиксированных значениях паросодержания Q_V =0.26, 0.465, 0.625, 0.73; $t = -10^{\circ}$C, $\mathrm{Pr} = 3.05$.

Список литературы:

1. Geshev P.I. A Linear Model of Close-to-Wall Turbulent Transfer, *Russian Journal Engineering Thermophysics*, 1993, vol. 3, no. 1, pp. 49-89.
2. Fredheim A.O. Thermal design of coil-wound LNG heat exchangers, shell-side heat transfer and pressure drop, Ph.D. Thesis, Norwegian Institute of Technology, 1994.

Исследования выполнены в рамках гос. задания
ИТ СО РАН (№ 121031100246-5)

УДК 536.24

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПАРЫ ЦИЛИНДРОВ В ПОПЕРЕЧНОМ СЖИМАЕМОМ ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ

Здитовец А.Г., Киселев Н.А., Виноградов Ю.А.
НИИ механики МГУ,
119192, Россия, Москва, Мичуринский пр-кт, 1

Аэродинамическое охлаждение – это снижение температуры поверхности теплоизолированного тела ниже значений статической температуры набегающего газового потока. Вероятно, впервые это явление было зафиксировано в работе Эккерта и Вайзе [1]. Они обнаружили, что температура поверхности кругового цилиндра, обтекаемого поперечным воздушным потоком может существенно снижаться в окрестности задней критической линии. Как было показано в последующих исследованиях, данное явление связано с перераспределением температуры торможения потока (энергоразделением) в нестационарном вихревом следе, образующемся за цилиндром. При числах Маха набегающего потока 0.5-0.65 охлаждение тыльной поверхности цилиндра максимально и может достигать десятков градусов. Используя этот эффект, можно осуществить теплообмен между потоками с одинаковыми начальными температурами торможения. К настоящему времени установлено, что величина охлаждения зависит от интенсивности сходящих вихрей, что проявляется в снижении коэффициента донного давления. Так как подавление вихреобразования путем внесения разделительной пластины в область формирования вихря, так и интенсификация этого процесса за счет резонанса с наложенными акустическими колебаниями приводят в первом случае к росту коэффициента донного давления и температуры поверхности цилиндра в тыльной области, а во втором - к снижению этих величин. Таким образом, неявно установлено, что влияя на параметры вихревого следа возможно как интенсифицировать, так и подавить аэродинамическое охлаждение. Известно, что при обтекании пары тел их вихревые следы интерферируют между собой, что выражается в зависимости параметров потока в следе каждого из тел от расстояния между ними. В работе [2] впервые численно рассмотрено влияние режимов интерференции вихревых следов при обтекании пары круговых цилиндров, расположенных бок о бок в поперечном дозвуковом сжимаемом потоке, на эффект аэродинамического охлаждения. Для чисел Рейнольдса Re=1000 и Маха до 0.8 показано, что на определенных режимах интерференции охлаждение пары цилиндров может достигать бо́льших значений и распространятся на бо́льшую площадь поверхности по сравнению с одиночным цилиндром. В настоящей работе проведены экспериментальные исследования аэродинамического охлаждения пары одинаковых круговых цилиндров, стоящих бок о бок в поперечном потоке (диапазон чисел Маха M=0.34-0.60, Рейнольдса Re=1.5·10^5-3.5·10^5). Исследованные расстояния между цилиндрами покрывали ключевые режимы интерференции вихрей: одиночный, бистабильный и спаренной вихревой дорожки.

Исследования проводились на аэродинамической установке баллонного типа НИИ механики МГУ. Рабочий канал образован плоскими стенками и имел постоянное поперечное сечение 250x174 мм^2. В боковой стенке рабочего канала было выполнено окно, через которое проводилась съемка тепловизором части тыльной поверхности цилиндров. Круговые цилиндры из оргстекла диаметром 20 мм использовались в качестве теплоизолированных моделей.

В результате показано, что эффект аэродинамического охлаждения существенно зависит от режима интерференции вихрей и скорости (числа Маха) набегающего потока. На режиме спаренной вихревой дорожки аэродинамическое охлаждение пары цилиндров достигало бо́льших значений, чем одиночного цилиндра при одинаковом уровне потерь давления в канале аэродинамической установки (см. рис.1)

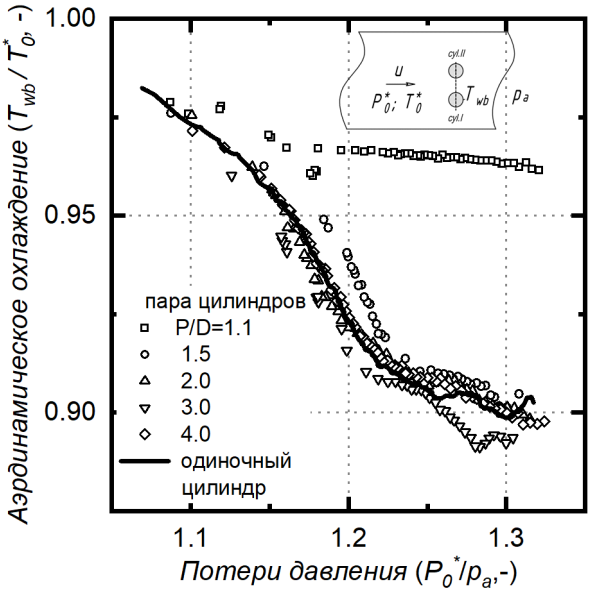


Рис.1. Снижение температуры поверхности цилиндра в задней критической линии относительно начальной температуры торможения T_0^* потока в зависимости от потерь давления в рабочем канале. P/D- относительное расстояние между цилиндрами (P-расстояние между центрами цилиндров, D – диаметр)

Список литературы:

[1] E. Eckert, W. Weise, Messungen der Temperaturverteilung auf der Oberfläche schnell angeströmter unbeheizter Körper, Forsch. Auf Dem Gebiete Des Ingenieurwesens. 13 (1942) 246–254. https://doi.org/10.1007/BF02585343.

[2] A.I. Aleksyuk, The Eckert–Weise effect and energy separation under the flow interference behind side-by-side cylinders, J. Fluid Mech. 915 (2021) A95. https://doi.org/10.1017/jfm.2021.128.

Работа выполнена при поддержке Гранта РНФ №22-29-00443

УДК 621.9

ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЕ ПРОДОЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ СТРЕЛОВИДНОГО КРЫЛА

Бойко А.В.[1], Бородулин В.И[1], Иванов А.В. [1], Мищенко Д.А. [1], Черепанов А.Д. [1]

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

Турбулентный пограничный слой (ТПС) часто рассматривают, как течение с недетерминированными, сугубо хаотичными по времени пульсациями и унифицированными осредненными по времени нормальными профилями пульсаций и профилями средней скорости. Однако авторы концепции «детерминированной турбулентности» [1] показали, что постпереходный турбулентный пограничный слой на плоской двумерной пластине может сохранять высокую степень корреляции мгновенных полей пульсаций скорости с первоначальными линейными возмущениями в ламинарной части пограничного слоя. В эксперименте [1] авторы многократно воспроизводили начальные и граничные условия, и многократно воспроизводили мгновенную структуру крупномасштабных возмущений в турбулентном пограничном слое, т.е. фактически осуществляли управление мгновенной структурой турбулентного пограничного слоя.

В отличие от ламинарно-турбулентного перехода на плоской пластине, исследованного в [1], где драйвером перехода выступает неустойчивость Толлмина-Шлихтинга, на стреловидном крыле доминирует неустойчивость поперечного течения (НПТ), усиливающая существенно трехмерные продольные стационарные вихри. При достижении критических амплитуд неустойчивых стационарных вихрей НПТ, сильные поперечные градиенты скорости создают условия для вторичной высокочастотной неустойчивости, которая быстро разваливает ламинарную структуру течения и пограничный слой переходит в турбулентное состояние. Возможно ли сохранение в постпереходном ТПС скользящего крыла информации о стационарных ламинарных вихрях НПТ - первичных возмущениях, приведших течение к турбулентности?

Исследователи использующие панорамные экспериментальные методы визуализации ламинарно-турбулентного перехода (ЛТП) на стреловидных крыльях неоднократно отмечали в постпереходном ТПС следы продольных структур, похожих на продольные вихри в ламинарной части. Например, такие следы («footprints», «traces») продольных структур в турбулентности были отмечены авторами работ [2] и [3], использующими нафталиновые или термочувствительные покрытия для визуализации картины ЛТП. Однако достоверных выводов о реальном наличии продольных структур в ТПС сделано не было.

В данной работе исследования ламинарно-турбулентного обтекания стреловидного крыла проводились на экспериментальной модели СК45 в малотурбулентной дозвуковой аэродинамической трубе Т-324 ИТПМ СО РАН. Модель крыла имеет угол стреловидности 45 градусов, длина хорды крыла по нормали к передней кромке 0.7 м. Степень турбулентности набегающего потока была невысока (Tu ~ 0,1%), таким образом ЛТП на СК45 происходил по сценарию усиления стационарных вихрей НПТ, а роль бегущих волн НПТ была незначительной. Неустойчивые вихри НПТ провоцировались контролируемыми периодическими круглыми элементами шероховатости на передней кромке крыла, в результате порождалась система стационарных вихрей НПТ заданного поперечного масштаба, приводящая течение к ЛТП в удобном для наблюдения положении, в районе середины хорды.

Анализ состояния и структур пограничного слоя при ламинарно-турбулентном обтекании стреловидного крыла СК45 проводился с использованием тепловизионной камеры с последующей обработкой полученных тепловизионных данных по методу *количественной термографии* [4]. Так как метод количественной термографии использует для диагностики пограничного слоя нормированные скорости охлаждения экспериментальной модели, пропорциональные актуальному трению на стенке, это позволяет отстроиться от предыстории течения, исключить нежелательные «следы», а визуализировать только актуальное состояние и структуры пограничного слоя.

Проведенный анализ тепловизионных данных и оценка скоростей охлаждения модели позволили детектировать стационарные вихри на ламинарном участке обтекания, детектировать их трансверсальный масштаб и степень их нарастания. Наличие продольных структур в переходной и постпереходной (турбулентной) области пограничного слоя было также надежно диагностировано. Поперечные масштабы и характер поведения обнаруженных долгоживущих продольных структур в ламинарной, переходной и турбулентной части течения будет обсуждаться в представленном докладе.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант 23-19-00644)

Список литературы:

1. Borodulin V.I., Kachanov Y.S., Roschektayev A.P. Experimental detection of deterministic turbulence // Journal of Turbulence Vol. 12, N 23, pp. 1-34. (2011) Doi:
2. Dagenhart JR, Saric WS, Mousseux MC, S. J. Crossflow-vortex instability and transition on a 45 deg swept wing. in *AlAA 20th Fluid Dynamics, Plasma Dynamics and Lasers Conference* (1989).
3. Lemarechal J., Costantini M., Klein C., Kloker M.J., Würz W., Kurz H.B.E., Streit T., Schaber S. Investigation of stationary crossflow-instability induced transition with the temperature-sensitive paint method. Exp. Therm. Fluid Sci. 109, (2019).
4. Boiko A.V., Ivanov A.V., Borodulin V. I., Mischenko D. A. Quantification technique of transition to turbulence in boundary layers using infrared thermography. Int. J. Heat Mass Transf. Vol. 183, pp. 122065 (2022).

УДК 532.542.3

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДИНОЧНОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ПАФФА В ОТКРЫТОЙ СТРУЕ

Иващенко В.А.[1,2], Шаров К.А.[1], Леманов В.В.[1], Никитин Н.В.[3], Мулляджанов Р.И.[1,2]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1
[3] НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова,
119192, Россия, Москва, пр. Мичуринский, 1

Истечение одиночного турбулентного паффа в открытую область является актуальной и важной темой в области гидродинамики и аэродинамики. Турбулентные паффы играют значительную роль в процессах переноса массы, импульса и энергии в различных природных и инженерных системах. Изучение поведения таких структур помогает детальнее понять механизмы, стоящие за турбулентностью, и улучшить модели, используемые для прогнозирования различных физических явлений, от атмосферной динамики до технических применений в аэрокосмической и химической промышленностях.

В данной работе представлены результаты исследования, основанного на методе прямого численного моделирования (DNS), что позволяет получать детализированное и точное описание турбулентных структур. Прямое численное моделирование обеспечивает полное разрешение всех масштабов турбулентности, что особенно важно для анализа тонких структур и динамики паффа. Для подтверждения достоверности численных данных, результаты моделирования сопоставлены с экспериментальными данными, полученными в Институте теплофизики. Пример сравнения мгновенных полей скорости вблизи заднего фронта паффа представлен на Рис. 1. Расчет проводится с помощью открытого вычислительного пакета Nek5000 [1], при этом входные условия для него генерируются отдельно в вычислительном коде Никитина Н.В. [2], который позволяет провести расчет длинной трубы при переходных числах Рейнольдса 2200-2400 при низких вычислительных затратах.

Целью данного исследования является описание механизмов формирования и эволюции одиночного турбулентного паффа, а также анализ эволюции его характеристик при истечении в открытую область, что имеет прямое приложение к решению практических задач, связанных с управлением потоками и оптимизацией процессов в различных инженерных системах.

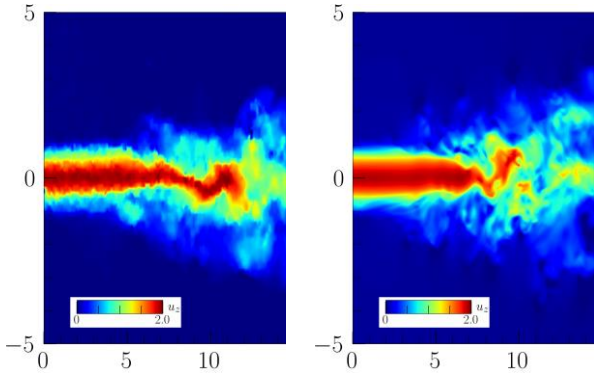


Рис. 1. Сравнение мгновенных полей скорости в районе заднего фронта паффа в эксперименте (слева) и в расчете (справа)

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00584. Вычислительные алгоритмы модифицированы в рамках государственного задания ИТ СО РАН. Авторы благодарны Институту теплофизки СО РАН за предоставленные вычислительные ресурсы суперкомпьютера “Каскад”.

Список литературы:

1. NEK5000 Version 20.0. 2022. Argonne National Laboratory, Illinois. Available: https://nek5000.mcs.anl.gov.
2. Nikitin N. V., Pimanov V. O. Numerical study of localized turbulent structures in a pipe //Fluid Dynamics. 2015. Т. 50. С. 655-664.

Работа поддержана РНФ
(грант № 23-29-00584)

УДК 621.9

УСИЛЕНИЕ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ОТРЫВНОГО ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА В ПРОФИЛИРОВАННОЙ КАНАВКЕ ТИПА БУМЕРАНГ НА ПЛАСТИНЕ ПРИ ОПТИМАЛЬНОЙ ДЛИНЕ ОРИЕНТИРОВАННОЙ ПО ПОТОКУ КОНЦЕВОЙ ЧАСТИ

Исаев С.А.[1,2], Никущенко Д.В.[1], Попов И.А.[3], Сероштанов В.В.[4], Миронов А.А.[3], Клюс А.А.[2]

[1] Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 90121, Россия, Санкт-Петербург, ул.Лоцманская, 3

[2] Санкт-Петербургский государственный университет им. Главного маршала авиации А.А. Новикова,196210, Россия, Санкт-Петербург, ул. Пилотов, 38

[3] Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – Казанский авиационный институт,

420015, Россия, Республика Татарстан, Казань, ул. К. Маркса, 68

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

Открытие аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена в наклонной канавке на стенке канала и на пластине [1] сделано численно и подтверждено экспериментально для канавки – удлиненной овально-траншейной лунки, составленной из двух половинок сферической лунки и прямой цилиндрической вставки. Для стабилизированного участка турбулентного течения в канале с однорядными канавками наблюдается многократное увеличение абсолютных относительных величин отрицательного трения и числа Нуссельты на дне входной части [2]. Однако в концевой части канавки наблюдается угнетенный теплообмен, поскольку закрученный поток выходит из канавки, не доходя до ее конца. Предложена форма профилированной канавки с изломом образующей траншейной части [3], т.е. входная часть наклонена к набегающему потоку, а концевая часть ориентируется по потоку. Такая форма позволяет сохранить спиралевидный вихрь в канавке вплоть до выхода его из концевой части.

В данной работе рассматривается цифровой аналог теплофизического стенда СПбПУ [4], в котором на нагретой части пластины размещается единичная канавка в форме бумеранг – аналог [3]. Перед пластиной задается равномерный турбулентный поток воздуха перед пластиной с числом Рейнольдса Re=30000. Длина канавки с шириной 1 и глубиной 0.25 фиксируется и равна 7. Относительная длина наклонной входной части ξ варьируется от 0 до 1.

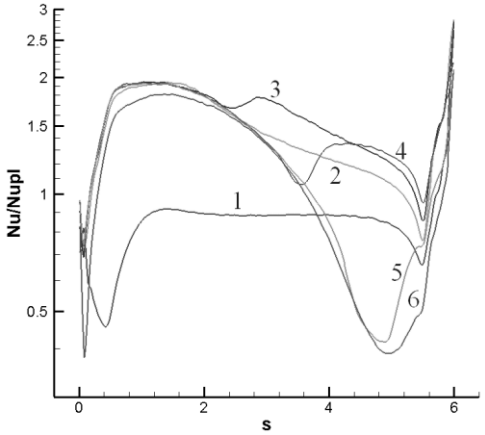


Рис.1. Сравнение распределений Nu/Nu_{pl} вдоль срединного сечения канавки типа бумеранг для различных относительных длин наклонного участка. 1 – ξ =0; 2 – 0.2; 3 – 0.4; 4 – 0.6; 5 – 0.8; 6 – 1

Представленные на рис.1-2 результаты показывают, для оптимального относительного удлинения входной части зона интенсивного теплообмена распространяется на ее концевую часть и связана с проникновением в нее спиралевидного вихря.

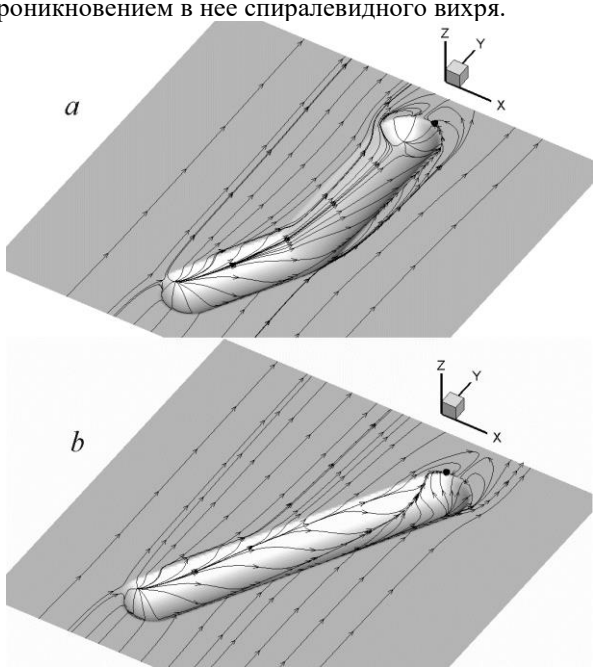


Рис.2. Сравнение картин растекания единичных канавок с ξ =0.4 (*a*) и 1 (*b*)

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

Список литературы:

1. Исаев С.А. Генезис аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена в наклонных канавках на структурированных поверхностях // МЖГ. 2022. №5. С.13-24.
2. Исаев С. А., Чулюнин А. Ю., Никущенко Д. В., Судаков А. Г., Усачов А. Е. Анализ аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена на стабилизированном участке узкого канала с однорядными наклоненными овально-траншейными лунками при использовании различных сеток и моделей турбулентности // ТВТ. 2021. Т. 59. № 1. С. 116–125.
3. Исаев С.А., Леонтьев А.И., Гортышов Ю.Ф., Попов И.А., Миронов А.А., Скрыпник А.Н., Аксянов Р.Х. Теплообменная поверхность. Патент РФ. RU 2768667 C1, МПК F28F 3/04 (2006.01). Заявка 2021115548, 31.05.2021 опубликована 24.03.2022 Бюл. № 9.
4. Isaev S.A., Sapozhnikov S.Z., Nikushchenko D.V., Mityakov V.Yu., Seroshtanov V.V. and Dubko E.B. Anomalous intensification of vortex heat transfer in the case of separated air flow over an inclined groove in a hot isothermal region of a flat plate // Fluid Dynamics. 2024.V.59. № 1. P.45-59.

УДК 621.9

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОДЕЛИРУЕМЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НАБЕГАЮЩЕГО ПОТОКА С ЗАТУПЛЕННОЙ ПЕРЕДНЕЙ КРОМКОЙ СТРЕЛОВИДНОГО КРЫЛА

Катасонов М.М.[1], Козлов В.В.[1]

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

В условиях модельного эксперимента исследованы процессы нестационарного взаимодействия искусственных возмущений внешнего потока с затупленной передней кромкой модели стреловидного крыла. Выявлены особенности возмущений трёхмерного пограничного слоя, возникающие благодаря сильно затупленной передней кромке и наличию поперечного течения.

Эксперименты проводились в дозвуковой аэродинамической трубе Т-324 ИТПМ СО РАН, с рабочей частью 1 × 1 × 4 м. Скорость набегающего потока составляла U_∞ = 5,3 м/с, степень турбулентности не более 0,04 %. Использовалась модель стреловидного крыла размахом L= 0,95 м и хордой С=0,8 м и углом стреловидности 30°. Модель помещалась вертикально в рабочую часть аэродинамической трубы под углом атаки α = 5,7°. Возмущения генерировались методом импульсного вдува воздуха через трубку внешним диаметром 2.5 мм, внутренним 2 мм. Источник возмущений (трубка) помещалась перед носиком крыла под углом 30 градусов к направлению потока, Длительность выдува воздуха из трубки задавалась быстродействующим электромагнитным клапаном. Электрический сигнал, открывающий клапан имел длительность 200 мс и повторялся с частотой 2 Гц. Сигнал был синхронизирован с системой регистрации возмущений. Измерения проводились термоанемометром постоянной температуры одноточным датчиком.

В отличие от исследований в “естественных” условиях [1], в настоящей работе нестационарное локализованное возмущение создается искусственно в набегающем потоке (см. рис. 1, а) и взаимодействует с зарождающимся пограничным слоем модели стреловидного крыла. В результате, в пограничном слое образуются несколько различных типов возмущений: продольное локализованное возмущение (см. рис. 1, б), и волновой пакет (см. рис. 2), как показали предыдущие исследования [2], являющийся пакетом волн Толлмина-Шлихтинга. В настоящем эксперименте в области благоприятного градиента давления высокочастотные возмущения затухают. В области неблагоприятного градиента давления нарастают лишь возникшие собственные возмущения, пакеты волн Т-Ш которые и приводят к ламинарно-турбулентному переходу. Появление волновых пакетов наблюдается в местах дефекта скорости, образованных нестационарным воздействием на пограничный слой.

При взаимодействии тонкой струйки с передней кромкой размер генерируемого возмущения в пограничном слое по трансверсальной координате Z становится в 3,5 раза больше, чем поперечный размер струйки воздуха, истекающей из источника. За счет сильного влияния поперечного течения вдоль линии растекания возмущение в пограничном слое становится несимметричным (см. рис. 1). Ниже по потоку происходит мультипликация областей дефекта и превышения скорости, составляющих продольное локализованное возмущение и увеличение его трансверсального размера пропорционально росту толщины пограничного слоя.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 23-29-00670, https://rscf.ru/project/23-29-00670/.

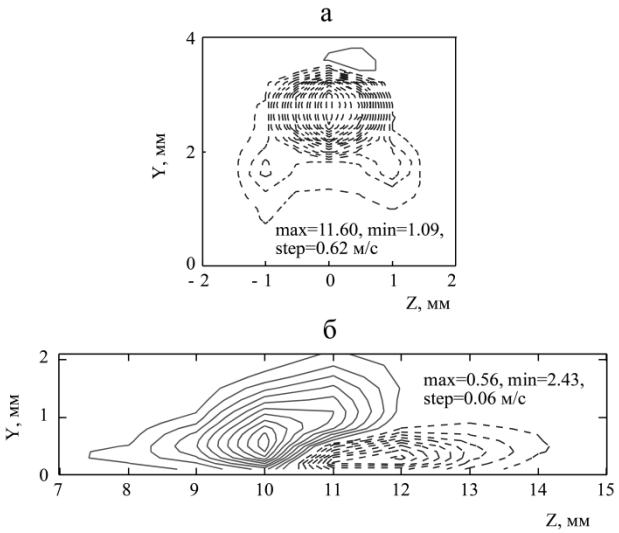


Рис.1. Изолинии пульсации скорости u′ в плоскости Y-Z при t=200 ms, сплошные линии - превышение, пунктирные - дефект u′; а - X/C= - 0.004 (в набегающем потоке); б - X/C=0.02 (в пограничном слое).

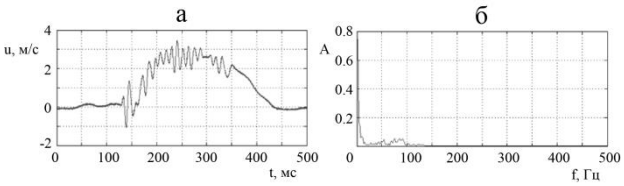


Рис.2. Осциллограмма возмущения (а) и её амплитудный спектр (б) при X/C = 0.44, Z = -62 мм.

Список литературы:

1. Alfredsson P. H., Matsubara M. Free-stream turbulence, streaky structures and transition in boundary layer flows // AIAA Paper. 2000. 2534.
2. Gorev V.N., Katasonov M.M. Origination and development of precursors on the fronts of streaky structures in the boundary layer on a nonswept wing // Thermophys. and Aeromech. 2004. Vol. 11, No. 3. P. 391-403.

УДК 004.9

СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ 3D-PTV И TOMO-PIV НА ПРИМЕРЕ ЗАТОПЛЕННОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУИ С ЗАКРУТКОЙ ПОТОКА

Кирчанова Е.Е.[1,2], Сорокин М.И.[1,2], Хребтов М.Ю.[1,2], Токарев М.П.[1,2], Дулин В.М.[1,2]

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

[2] Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Измерение трёхмерного распределения поля скорости является важной задачей при изучении основных характеристик анизотропных турбулентных течений, таких как закрученные струи. В наше время активно разрабатываются методы трёхмерной визуализации на основе изображений частиц-трассеров, полученных с разных ракурсов. Для обработки изображений используются разнообразные математические подходы.Наиболее часто применяемые методы:

- Трехмерная анемометрия по трекам частиц (3D-PTV) [2], позволяющая отследить местоположение и скорость каждой отдельной частицы для их малой концентрации. Метод основан на вероятностном определении одной и той же частицы в пространстве на паре кадров и восстановлении её трехмерных координат путем триангуляции;
- Томографический метод анемометрии по изображениям частиц PIV (Tomographic PIV) [3], восстанавливающий объемные 3D изображения интенсивности частиц, по которым определяется групповая скорость частиц в перемещаемом по пространству окне опроса;
- Лагранжевый метод анализа траекторий частиц [4] – совокупность первых двух методов в условиях регистрации изображений с высоким временным разрешением. Метод позволяет отслеживать отдельные частицы даже если их траектории пересекаются на проекциях, то есть при высоких концентрациях.

Был обработан эксперимент со спиральными режимами течения в струях разной степени закрутки [5,6]. Закрученный струйный поток был организован в замкнутом гидродинамическом контуре, который включал резервуар для воды, насос, расходомер и испытательную секцию. Расход контролировался с помощью обратной связи от расходомера к насосу. Сужающее сопло, содержащее сменные лопастные завихрители, создавало закрученный струйный поток.

Поток засевали частицами полиамида размером 50 мкм, которые имели почти нейтральную плавучесть. Объем измерения с размерами 40 × 40 × 40 мм был снят четырьмя высокоскоростными КМОП-камерами (Photron FASTCAM SA5) с размером сенсора 1024 × 1024. Камеры были оснащены макрообъективами SIGMA AF 105 мм f/ 2.8 EX DG. Оптическое увеличение в эксперименте составило 0,284 при диафрагме f/16, что обеспечивало относительно большую глубину резкости (приблизительно 40 мм). Горизонтально выровненные камеры были направлены в центр измерительного объема под разными углами обзора: 39°, 23°, -18° и -31° градус относительно оси z.

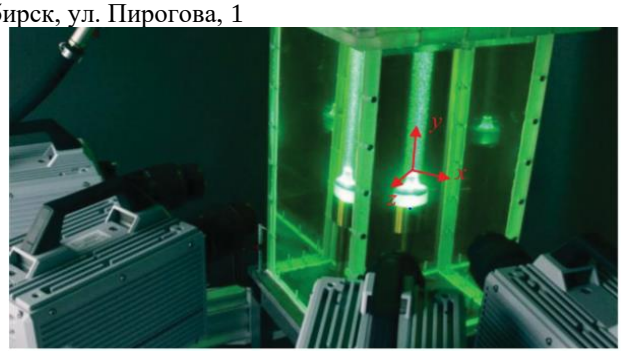


Рисунок 1. Фото экспериментальной установки

В ходе работы найдены поля скорости для двух соседних кадров с использованием двух методов Tomo-PIV и 3D-PTV, а также их сравнение уже с имеющимися результатами, опубликованными в статьях[5, 6].

Работа выполнена за счет средств государственного задания в ИТ СО РАН.

Список литературы:

1. Xu H. et al. High order Lagrangian velocity statistics in turbulence //Physical review letters. – 2006. – Т. 96. – №. 2. – С. 024503.
2. Virant M., Dracos T. 3D PTV and its application on Lagrangian motion //Measurement science and technology. – 1997. – Т. 8. – №. 12. – С. 1539.
3. Atkinson C., Soria J. An efficient simultaneous reconstruction technique for tomographic particle image velocimetry //Experiments in Fluids. – 2009. – Т. 47. – №. 4. – С. 553-568.
4. Schanz D., Gesemann S., Schröder A. Shake-The-Box: Lagrangian particle tracking at high particle image densities //Experiments in fluids. – 2016. – Т. 57. – №. 5. – С. 1-27.
5. Markovich D. M. et al. Helical modes in low-and high-swirl jets measured by tomographic PIV //Journal of Turbulence. – 2016. – Т. 17. – №. 7. – С. 678-698.
6. Alekseenko S. V. et al. Coherent structures in the near-field of swirling turbulent jets: A tomographic PIV study //International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2018. – Т. 70. – С. 363-379.

УДК 534.24

НАРУШЕНИЕ АНАЛОГИИ РЕЙНОЛЬДСА В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ С ГРАДИЕНТОМ ДАВЛЕНИЯ В МАЛОРАЗМЕРНОМ СВЕРХЗВУКОВОМ ЩЕЛЕВОМ КАНАЛЕ

Киселёв Н.А.[1], Маластовский Н.С.[1,2], Здитовец А.Г.[1], Виноградов Ю.А.[1]

[1] НИИ механики МГУ,
119192, Россия, Москва, Мичуринский пр., 1
[2] Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская, 5

В данной работе рассмотрена внутренняя задача течения газа в щелевом сверхзвуковом канале, с положительным градиентом давления. Такая постановка требовала предварительного ускорения потока от дозвукового на входе до сверхзвукового на выходе из сопла/входе в исследуемый участок с градиентом давления, что приводило к необходимости учета предыстории потока и влияние неравновесного отрицательным градиента давления на пограничные слои и фактор аналогии Рейнольдса. Экспериментальные значения коэффициента трения были получены методом Шапиро-Хоторна [1]. Коэффициенты теплоотдачи и коэффициенты восстановления температуры определялись на основании нестационарного метода восстановления тепловых потоков с использованием ИК камеры. Полученные данные сопоставлены с численными значениями, определенными путем решения системы уравнений пограничного слоя для стационарного потока в двухмерной постановке вплоть до скачка уплотнения. Обобщение получаемых результатов основывалось на сравнении со значениями коэффициентов трения и теплоотдачи равновесных пограничных слоев, полученных из решения Меллора и Гибсона [2] для динамического пограничного слоя и Со [3] для теплового.

Исследовался сверхзвуковой щелевой канал с входным сечением 38.6×3.8 мм^2 и критическим сечением 12×3.8 мм^2, протяженностью 0.3 м. Канал состоит из сверхзвукового сопла, исследуемой сверхзвуковой области с положительным градиентом давления и выходного диффузора.

Профиль сопла взят из атласа плоских сопел [4] с расчетным изоэнтропическим числом Маха на выходе M=2.0. На выходе из сопловой части канала располагалась исследуемая область с продольным градиентом давления. Изменение величины градиента давления достигалось за счет изменения угла раскрытия сверхзвуковой части и осуществлялось за счет смены всего канала. Геометрия сверхзвукового сопла (и, соответственно, параметры потока до начала участка с градиентом давления) при этом сохранялась.

Наложение градиента давления реализовано следующим образом. Изменение числа Маха вдоль линии тока возможно только при неравенстве нулю суммы внешних воздействий на поток: трения, геометрическое воздействия, подвода массы и подвода теплоты [5]. Из всех возможных воздействий на поток в данной работе присутствуют только воздействия трением и изменением поперечного сечения. В отсутствие геометрического воздействия будет наблюдаться снижение числа Маха (и, соответственно, продольный градиент давления) из-за наличия трения. Добавление геометрического воздействия, приводит к снижению величины положительного градиента давления вплоть до безградиентного течения и, далее, течения с незначительным отрицательным градиентом.

Боковые стенки сверхзвуковой части канала выполнены линейными. Угол раскрытия менялся в диапазоне 0-4°. Переход боковых стенок от сопла к сверхзвуковому каналу выполнен по касательной. Канал с углом раскрытия 0° соответствовал максимально достижимому в данной конфигурации неблагоприятному градиенту давления. Безградиентное течение реализовано в канале с углом раскрытия 3°. В качестве параметра, характеризующего градиент давления использовался введенный Клаузером, параметр градиента давления $\beta=(\delta^*/\tau_w)\cdot(dp/dx)$ [6,7]

Получено, что наложение положительного градиента давления приводит к снижению коэффициента трения c_f и незначительному снижению коэффициента теплоотдачи St, практически не влияет на коэффициент восстановления температуры r. В свою очередь, такое изменение St и c_f приводит к незначительному увеличению фактора аналогии Рейнольдса $s=2\cdot St/c_f$.

Отмечено что, в отличие от других реализованных течений сжимаемого газа с положительным градиентом давления, на параметры пограничных слоев в канале существенно влияет предыстория потока, так как пограничный слой подвержен ускорению в сверхзвуковом сопле.

Показано, что фактор аналогии Рейнольдса s при наложении положительного градиента давления растет. Однако величина s в таких течениях существенно ниже равновесных значений и по мере развития пограничного слоя восстанавливается до них.

Список литературы:

1. A.H. Shapiro, W.R. Hawthorne, The Mechanics and Thermodynamics of Steady One-Dimensional Gas Flow, J. Appl. Mech. Trans. ASME. 14 (1947) A317–A336.
2. G.L. Mellor, D.M. Gibson, Equilibrium turbulent boundary layers, J. Fluid Mech. 24 (1966) 225–253.
3. R.M.C. So, Pressure gradient effects on Reynolds analogy for constant property equilibrium turbulent boundary layers, Int. J. Heat Mass Transf. 37 (1994) 27–41.
4. A.M. Ovsannikov, U.G. Pirumov, E.M. Pletneva, G.S. Roslyakov, Atlas ploskih sopel, Moscow University Press, Moscow, 1976.
5. A.H. Shapiro, The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow, The Ronald Press Company, New York, 1953.
6. F.H. Clauser, Turbulent Boundary Layers in Adverse Pressure Gradients, J. Aeronaut. Sci. 21 (1954) 91–108.
7. F.H. Clauser, The Turbulent Boundary Layer, Adv. Appl. Mech. 4 (1956) 1–51.

Работа выполнена при поддержке Гранта РНФ №19-79-10213

УДК 621.45.038.4

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ ГАЗОВОЙ ЗАВЕСЫ ЗА ОТВЕРСТИЯМИ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Колесова А.А.[1], Веретенников С.В.[1], Колесова Е.Г.[2], Евдокимов О.А.[1]

[1] Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьева,
152934, Ярославская область, г. Рыбинск, ул. Пушкина, д. 53
[2] ПАО ОДК «Сатурн»
152903, Ярославская обл., г. Рыбинск, проспект Ленина, д. 163

Заградительное охлаждение является одним из способов тепловой защиты сопловых и рабочих лопаток газовой турбины, при котором охлаждающий воздух вдувается в высокотемпературный поток через проницаемый участок поверхности и позволяет защитить область вдува и поверхность, расположенную за ней [1,2]. Для вдува газовой завесы на практике обычно используются отверстия цилиндрической формы, которые являются наиболее простыми в изготовлении. Однако, большое количество научных работ, выполненных в отечественной и зарубежной практике, показали, что эффективность охлаждения за отверстиями сложной геометрической формы в несколько раз превышает эффективность охлаждения цилиндрических отверстий.

Согласно исследованиям за отверстиями для вдува газовой завесы образуется большое количество вихревых структур. Наиболее негативное влияние оказывает почкообразный вихрь [3], который вращается в двух противоположных направлениях и подмешивает основной поток к защищаемой поверхности. Работы по визуализации структуры течения показывают формирование данной вихревой структуры за отверстием цилиндрической формы.

Работы по визуализации структуры течения за отверстиями различной геометрической формы с последующей валидацией с компьютерным моделированием для настройки численных моделей в настоящий момент являются наиболее актуальными и важными. В работе выполнено экспериментальное исследование структуры течения струи охладителя на плоской поверхности за одиночными отверстиями цилиндрической, веерной формы с коротким (1 калибр) и длинным (3 калибра) диффузорым участком при изменении параметра вдува m от 0,5 до 1,5. Диаметр цилиндрической части отверстия был равен 8мм.

Испытательный объект изготавливался методом 3D прототипирования из PLA пластика. Экспериментальный отсек представлял собой плоский канал с оптическим доступом с трех сторон. Экспериментальное исследование выполнялось методом цифровой трассерной визуализации (PIV) в два этапа. В начале выполнялось исследование формирования газовой завесы в продольном направлении, при этом засеивался основной поток.

По результатам исследования было получено, что за отверстием цилиндрической формы отрыв пелены от поверхности происходит при m>1. За другими формами отверстий на всех исследуемых режимах отрыва газовой завесы не наблюдалось. С увеличением параметра вдува от 0,5 до 1,5 наблюдалось увеличение продольной компоненты скорости (направлена по течению основного потока) за отверстием цилиндрической формы и веерной формы с коротким диффузорным участком, что свидетельствует о подмешивании основного потока к защищаемой поверхности.

На втором этапе работ выполнялось экспериментальное исследование структуры течения за отверстиями различной геометрическо формы на удалении 1 калибра от места вдува. В ходе эксперимента засеивался только вторичный поток. По результатам экспериментального исследования было получено, что за отверстием цилиндрической и веерной формы с коротким диффузорным участком на всех исследуемых режимах формируется почкообразный вихрь, который способствуют подмешиванию основного потока к защищаемой поверхность. За веерным отверстием с длинным диффузорным участком вихревых структур практически не заметно, что свидетельствуют о сильной нестационарности струи охладителя за данной формой отверстия. За отверстием цилиндрической и веерной формы с длинным диффузорным участком при увеличении параметра вдува от 0,5 до 1,5 наблюдается увеличение поперечной компоненты скорости, которая направлена перпендикулярно основному потоку, что свидетельствует о глубоком проникновении газовой завесы в ядро основного потока.

Таким образом, по результатам исследования было получено, что за отверстием цилиндрической формы при m>1 происходит отсоединение защитной пелены от поверхности. За отверстием веерной формы с коротким диффузорным участком и цилиндрической формы при изменении параметра вдува от 0,5 до 1,5 формируются почкообразные вихри и наблюдается подмешивание основного потока. За отверстием с длинным диффузорным участком вихревых структур практически незаметно. Применение отверстий с длинным диффузорным участком способствует повышению эффективности заградительного охлаждения.

Список литературы:

1. Теплопередача в охлаждаемых деталях газотурбинных двигателей летательных аппаратов / В.И. Локай, М.Н. Бодунов, В.В. Жуйков, А.В. Щукин. -М.; Машиностроение, 1985,-216с.
2. Теория тепловой защиты стенки вдувом газа / В.М. Репухов. - Киев: Наукова Думка, 1980. - 296 с.
3. Sgarzi, O. Analysis of vortices in three-dimensional jets introduced in a cross-flow boundary-layer. // ASME Paper 97-GT-517.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00666.

УДК 536.48

ИЗМЕНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ПРИ РАСПАДЕ КВАНТОВОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

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

Повышенный интерес к изучению распада вихревой структуры связан с тем фактом, что в некоторых экспериментах наблюдается квазиклассическое поведение распада квантовой турбулентности. Использование новых экспериментальных методов [1] позволяют получить измерение скоростей в различных точках в исследуемом экспериментальном объеме. Следовательно, возможно определить продольные и поперечные структурные функции скорости второго порядка, т. е. моменты второго порядка приращения скорости между двумя точками, которые разнесены в пространстве на вектор **l:**

$$S_2^{\text{Ц}} = \langle \delta\upsilon_{\text{Ц}}(l)^2 \rangle, \qquad S_2^{\perp} = \langle \delta\upsilon_{\perp}(l)^2 \rangle$$

где

$$\delta\upsilon_{\text{Ц}}(l) = \left[\mathbf{v}(\mathbf{r}+\mathbf{l}) - \mathbf{v}(\mathbf{r})\right]\cdot \mathbf{l}/l,$$

В данном случае **r, r+l –** это радиусы–векторы, которые определяют положение элементов жидкости, **v(r), v(r+l) –** соответственно их скорости. Угловые скобки означают, что усреднение проводится по всему ансамблю, т.е. по всем возможным парам точек, которые разделены расстоянием **l**, а именно по всем **r**, в которых проводилось измерение скорости. Колмогоров в своей известной работе из размерных соображений получил степенной закон для структурной функции второго порядка:

$$S_2^{\text{Ц}} \propto \varepsilon^{2/3} (l)^{2/3},$$

здесь $\varepsilon = -dE/dt$ -- скорость диссипации энергии. Это знаменный закон «двух третей». В k-пространстве этой зависимости соответствует энергетический спектр:

$$E(k) = C\varepsilon^{2/3} k^{-5/3},$$

здесь $C \approx 1$, $k = 2\pi/l$ -- волновое число. Используя преобразование Фурье для перехода в пространство волновых векторов, можно показать, что в общем случае зависимостям типа

$$S_2^{\text{Ц}} \propto (l)^n$$

в пространстве координат соответствуют зависимости в пространстве волновых чисел k:

$$E(k) \propto (k)^{-n-1}$$

В данной работе тщательно исследован распад сверхтекучей турбулентности при температурах 0 К, 1.3 К, 1.6 К, 1.9 К и получены энергетические спектры. Проведенные численные расчеты показали, что распад вихревого клубка до тех пор, пока клубок не станет разреженным и процессы перезамыканий элементов нитей практически прекращаются, обусловлен процессами реконнекций (см. рис.1), что согласуется с теорией Фейнмана - Вайнена. Далее происходит более медленный распад. При повышенных температурах распад обусловлен действием взаимной силой трения между нормальной и сверхтекучей компонентами He-II. При нулевой температуре уменьшение плотности вихревого клубка связано с распадом нелинейных волн Кельвина.

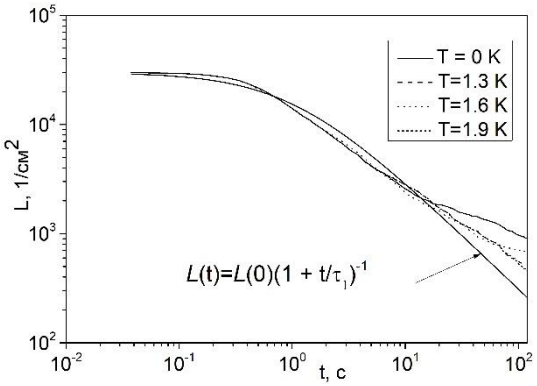


Рис. 1. Распад квантовой турбулентности при различных значения температуры He II.
$\tau_1 = 2\pi / \chi_2 \kappa L(0)$, $\chi_2 = 0.2$

Для расчета структурных функций с помощью датчика случайных чисел определялись $5\cdot10^4$ точек и в них рассчитывались скорости, наведенные вихревой конфигурацией петель по уравнению Био-Савара. Было получено, что показатель степени **n** изменяется от 0.78 до 1.36 (см. рис. 2), что согласуется с экспериментом [1].

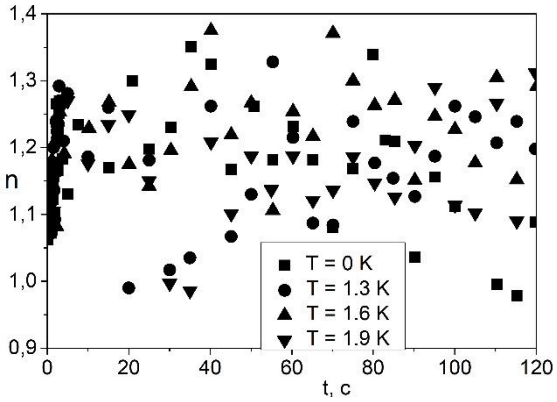


Рис. 2. Продольные структурные функции скорости второго порядка в разные моменты времени.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН (№ 122041400020-6).

Список литературы:

1. Gao J., Varga E., Guo W.. and Vinen W. F. Energy spectrum of thermal counterflow turbulence in superfluid helium-4 //Phys. Rev. B, 2017, V. 96, P. 094511-1 – 094511-8.

УДК 532.3, 53.02

ВЛИЯНИЕ ЩЕЛЕВОГО ЗАЗОРА НА ДИНАМИКУ РАЗВИТИЯ КАВИТАЦИОННЫХ ПОЛОСТЕЙ ВБЛИЗИ ДВУМЕРНЫХ ТЕЛ ОБТЕКАНИЯ

Кравцова А.Ю.[1,2], Цой М.А.[1], Скрипкин С.Г.[1,2], Литвинова Д.В.[1,2], Сиковский Д.Ф.[1], Маркович Д.М.[1,2]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] Новосибирский государственный университет,
630073, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Зачастую во время работы гидротехнического оборудования возникают кавитационные процессы. Кавитация развивается как в проточном тракте, так и в узких щелевых зазорах, которые неотъемлемо присутствуют в любых технических системах. Исследование кавитационных процессов в трехмерных кавитационных туннелях проводится уже много лет и получена обширная расчетная и экспериментальная база знаний. Так, показано, что изменение длины прикрепленной кавитационной полости вблизи двумерных тел обтекания увеличивается при уменьшении числа кавитации согласно следующему закону: $L/C = A\cdot\sigma^{-1}+B$, где L – длина кавитационной полости, C – длина тела обтекания, σ – число кавитации, A и B – определяемые экспериментальным путем константы [1-3]. Характерные безразмерные частоты отрыва паро-газовых полостей находятся в диапазоне 0,1-0,2 и 0,3-0,4 [4]. Однако, в недавних работах показано, что кавитация на двумерных крыльях расположенных в любой конфигурации трехмерных кавитационных туннелях имеет полностью трехмерный характер из-за эффектов боковых стенок [5-6]. При этом вопрос влияния боковых стенок щелевых зазоров на кавитацию практически не рассматривался.

Для определения влияния щелевого зазора на развитие кавитации были выбраны две конфигурации рабочего участка. Высота участка составила 1,2 мм, ширина – 120 мм и длина 145 мм и 276 мм. Возникновение и развитие кавитации исследовалось методами высокоскоростной визуализации с последующей алгоритмической обработкой данных. Также были проведены аналитические расчеты квазидвумерного кавитационного потока, что позволило выявить ряд особенностей.

Показано, что развитие кавитационной полости вблизи двумерных тел обтекания в щелевых зазорах происходит согласно следующей пропорциональности: $L/C \sim \sigma^{-1}$, что является общей тенденцией развития кавитационных полостей в каналах различной конфигурации. Для прямого сопоставления длин прикрепленных каверн, возникающих в щелевых зазорах и трехмерных кавитационных туннелях, был предложен дополнительный параметр, учитывающий сопротивление щелевого канала, $\lambda\cdot l/D$. Показано, что изменение длины парогазовой полости при переходе в щелевые зазоры связано с изменением динамики развития когерентных структур на боковых стенках рабочего участка.

Список литературы:

1. Le Q., Franc J.P., Michel J.M. Partial cavities – global behavior and mean pressure distribution // J. Fluids Eng. 1993. V. 115. P. 243–248.
2. Coutier-Delgosha O., Stutz B., Vabre A., Legoupil S. Analysis of cavitating flow structure by experimental and numerical investigations // J. Fluid Mech. 2007. V. 578. P. 171–222.
3. Kravtsova A.Yu., Markovich D.M., Pervunin K.S., Timoshevskiy M.V., Hanjalić K. High-speed visualization and PIV measurements of cavitating flows around a semi-circular leading-edge flat plate and NACA0015 hydrofoil // International Journal of Multiphase Flow. 2014. V. 60. P. 119– 134.
4. Callenaere, M., Franc, J.-P., Michel, J.-M. & Riondet, M. The cavitation instability induced by the development of a re-entrant jet // J. Fluid Mech. 2001. V. 444. P. 223–256.
5. Saito Y., Takami R., Nakamori I., Ikohagi T. Numerical analysis of unsteady behavior of cloud cavitation around a NACA0015 foil // Comput Mech. 2007. V. 40. P. 85–96.
6. Sedlar M., Soukal J., Komarek M., Volkov A.V., Ryzhenkov A.V. Numerical Simulation of Interaction between Fluid and Vapor Structures in Multiphase Flow around Hydrofoil // Journal of Applied Mathematics and Physics. 2018. V. 6. P. 1614-1624.

УДК 536.244

ТЕЧЕНИЕ В КАНАЛЕ С РАЗНОМАСШТАБНЫМИ ПРЕПЯТСТВИЯМИ: ОТСОЕДИНЕННЫМ РЕБРОМ И ОБРАЩЕННЫМ ПРОТИВ ПОТОКА УСТУПОМ

Дьяченко А.Ю., Кульпанович Г.Т., Смульский Я.И.
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

В конструктивную особенность компактного теплообменника может входить внезапное сужение канала. Внезапное сужение создается вперед обращенным уступом и повышает гидравлическое сопротивление канала. За уступом образуется отрывная область, в которой понижается теплоотдача от нагретой стенки. Большой интерес представляет изучение возможности управления процессом тепломассопереноса в таких системах с целью повышения теплогидравлических характеристик компактного теплообменника. Данная работа является развитием исследований авторов пассивных методов управления отрывом потока.

Было проведено численное моделирование течения в канале высотой 0.03 м и длиной 0.4м (Рис. 1). На расстоянии 0.1м от входа установлен обращенный вперед уступ высотой 0.01 м. Стенка, примыкающая к уступу, нагревалась постоянным тепловым потоком, остальные стенки были адиабатическими. На входе был ударный профиль, с числами Re по высоте уступа от 2700 до 16400. На выходе задавались мягкие граничные условия. Управляющим элементом было ребро высотой 0.3 калибра (высота уступа H), толщиной 0.1 калибра. Ребро устанавливалось на расстоянии 0.8 и 1.6 калибров до уступа на трех высотах от стенки до уступа: h = 0.2, 0.5 и 1 калибров.

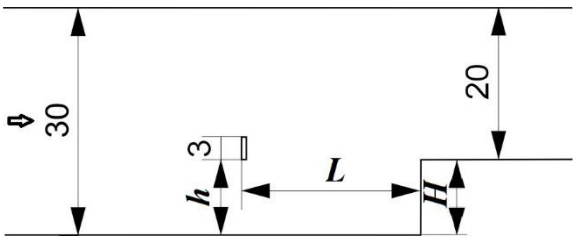


Рис. 1.Схема расчетной области. Размеры в мм.

Проведено двумерное численное моделирование с применением RANS подхода. Для замыкания уравнений Навье-Стокса была использована *k*-ω SST модель турбулентности. Связь скорости и давления устанавливалась посредством алгоритма SIMPLE.

Ребро создает собственную отрывную область в виде двух разнонаправленных вихрей. При обтекании вперед расположенного уступа перед ним образуется область повышенного статического давления с вихрем в углу, который занимает половину высоты уступа. Течение, попадая на оставшуюся часть уступа, разворачивается и возле кромки уступа создается положительная составляющая поперечной скорости, которая поднимает поток над стенкой за уступом. Далее происходит присоединение потока, а на отрезке от кромки уступа до места присоединения наблюдается рециркуляционная область. В этой зоне в силу малых скоростей наблюдается минимальная теплоотдача.

Гидравлическое сопротивление канала оценивается по потере полного давления на отрезке от 2.5 калибров до уступа до 10 калибров после уступа, так как на расстоянии 2.5*H* до него наличие внезапного сужения не вносит существенного влияния на статическое давление, а на расстоянии 10*H* за уступом продольный градиент давления становится несущественным. Наибольшее гидравлическое сопротивление канала наблюдается для случая, когда ребро расположено на высоте 1*H* и на расстоянии 0.8*H* и оно составляет 60% от случая при отсутствии ребра. Ребро в этом случае является дополнительным фактором сопротивления, связанным с сужением пропускного сечения канала, и оно максимально влияет на область за уступом. Наименьшее сопротивление наблюдается для низкорасположенного и далеко отстоящего ребра и составляет 16% от базового случая при числе Re=2700. Отсоединенное ребро в этом случае перестраивает отрывную область перед уступом таким образом, что основной поток отклоняется вверх и не попадает на уступ. Возле уступа образуется вихрь, который не дает потоку присоединиться на большую часть вертикальной стенки уступа. Часть потока, отклоненная ребром вниз, тормозится на вертикальной стенке возле кромки уступа.

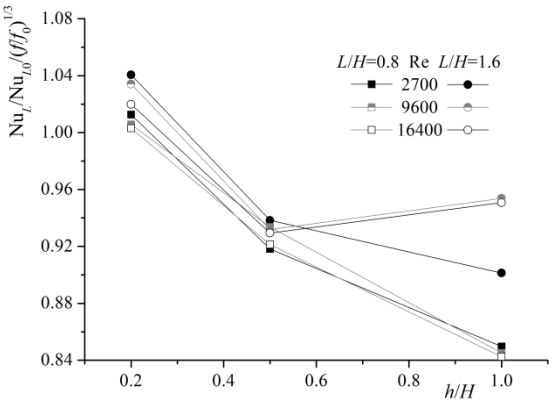


Рис.2.Теплогидравлическая эффективность канала в зависимости от положения ребра и числа Re.

Для оценки теплогидравлической эффективности используется комплекс $Nu_L/Nu_{L0}/(f/f_0)^{1/3}$, позволяющий учесть мощность на прокачку теплоносителя. Наиболее эффективными себя показали случаи с низко установленными ребрами, особенно при числе Re=2700 в случае с *L*/*H*=1.6, с повышением числа Re эффективность падает. Самым неэффективным является случай *L*/*H*=1.6 на высоте *h*/*H*=1.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

УДК 532.5

ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В МОДЕЛИ ТВС С 19 ИМИТАТОРАМИ ТВЭЛОВ

Лукьянов Ан.А.[1,2], Шестаков М.В.[1], Токарев М.П. [1]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Течение в пучках стержней присутствует в различных технических и энергетических приложениях, таких как теплообменники, парогенераторы и, в частности, некоторые типы ядерных реакторов. Дистанционные решетки являются традиционным компонентом тепловыделяющих сборок реакторов ВВЭР. Используемые в ТВС дистанционные решетки стали предметом исследований, которые способствовали пониманию структуры потока, турбулентного перемешивания, частот потока и адекватных вычислительных моделей, которые можно использовать для моделирования. Сравнение различных типов численных и экспериментальных результатов является важным шагом на пути к проверке и обоснованию численных инструментов, используемых при проектировании и лицензировании ядерных реакторов [1]. В настоящем исследовании мы стремимся создать валидированную численно-экспериментальную базу данных для создания новых моделей турбулентности в рамках RANS-подхода при помощи методов машинного обучения [2].

В данной работе проведено численное моделирование течения, формирующегося при обтекании пучка стрежней из 19 элементов, характерного для ядерной тепловыделяющей сборки с дистанционирующей решеткой канального типа с помощью кода OpenFOAM. Геометрия расчетной модели, дистанционирующей решетки и взаимное расположение имитаторов ТВЭЛов полностью повторяет геометрию экспериментального рабочего участка. Исследуется поток с числом Рейнольдса 9100, рассматриваемая система состоит из круглых цилиндров длиной L =300 мм, диаметром D = 10 мм. Цилиндры расположены в треугольной компоновке, с относительным шагом S=1,4. В середине канала устанавливается дистанционирующая решетка (Рис.1.). Уравнения Навье -Стокса решались для однофазного турбулентного потока. Для расчета турбулентности использовалась модель LES WALE. В работе [1] данная модель продемонстрировала хорошее решение для задач с похожей геометрией.

Эксперименты проводились на гидродинамическом стенде, оснащенном системами контроля расхода и температуры жидкости. Рабочий участок представлял собой шестигранный канал длиной 800 мм, внутри которого на трех дистанцирующих решетках расположены прозрачные оргстеклянные трубки. Для измерения полей скорости использовалась высокоскоростная PIV системы «Полис» (лазер New wave Pegasus, камера Photron FASTCAM SA5). Измерения мгновенных полей скорости проводились в продольных сечениях рабочего канала.

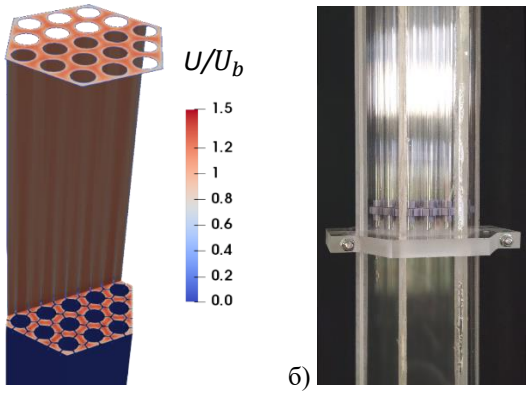


Рис.1. Расчетная область (а) и соответствующая ей часть исследовательского канала (б).

Численно и экспериментально исследована структура течения при обтекании модели ТВС с 19 имитаторами ТВЭЛов. На основе экспериментальных данных полей скорости проведена верификация данных LES расчета. Показано, что результаты численного расчета хорошо согласуются с результатами эксперимента. Проведен анализ турбулентных характеристик течения с целью определения влияния дистанцирующей решетки на структуру потока. На рис. 2 на примере профилей средней продольной скорости демонстрируется изменение структуры течения за решеткой.

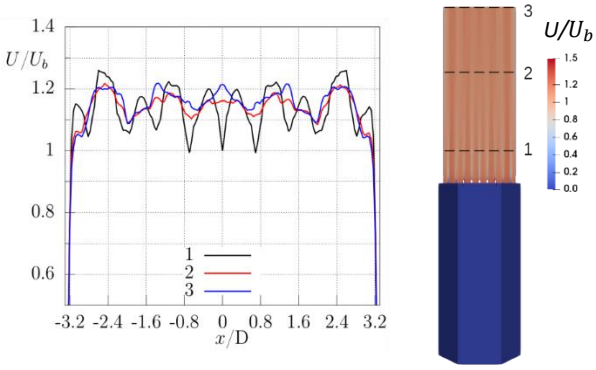


Рис.2. Распределение продольной компоненты скорости на разном расстоянии от решетки: 1 -Y/D_h =3; 2 -Y/D_h =10; 3 -Y/D_h =16

Список литературы:

1. Matozinhos C. F., Hassan Y. Scale-resolving simulations of the flow in a nuclear fuel bundle with a channel spacer grid using partially averaged Navier–Stokes and large-eddy simulation // Phys. Fluids. – 2023. – Т. 35. – №. 1
2. Li H. et al. Data-driven turbulence modeling for fluid flow and heat transfer in peripheral subchannels of a rod bundle // Phys. Fluids. – 2024. – Т. 36. – №. 2.

Исследование выполнено за счет гранта РНФ (№ 22-19-00587, https://rscf.ru/project/22-19-00587/)

УДК 532.5

LES ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАДИАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ НА ДИНАМИКУ ПРЕЦЕССИРУЮЩЕГО ВИХРЕВОГО ЯДРА В ВОЗДУШНОЙ ТУРБИНЕ ФРЕНСИСА

Лутченко И.И.[1,2], Палкин Е.В.[1], Мулляджанов Р.И.[1,2]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Гидроэнергетика играет значительную роль в мировой энергетике, предоставляя один из наиболее экологически чистых и устойчивых источников энергии. Тем не менее, из-за постоянно меняющегося запроса запроса потребителей, гидроэлектростанции вынуждены работать в непроектном диапазоне нагрузки. Один из таких режимов, режим частичной нагрузки, ведет к высокой остаточной закрутке потока после рабочего колеса, при которой в отсасывающей трубе (ОТ) турбины происходит распад вихря. В результате, в потоке формируется вихревая структура — прецессирующее вихревое ядро (ПВЯ). Она имеет форму спирального вихря и генерирует пульсации давления, приводящие к колебаниям мощности турбины и износу конструкции гидроагрегата [1].

Для предотвращения упомянутых негативных последствий ПВЯ применяются различные пассивные [1-4] и активные [1, 5-6] методы управления потоком. Наиболее выгодными являются активные (инжекции струй воды или воздуха). Существенным оказывается влияние пространственной ориентация этих струй. Работа, основанная на линейном анализе устойчивости в воздушной модели гидротурбины Френсиса, показала, что области потока наиболее восприимчивые к управлению находятся вблизи наконечника рабочего колеса [7]. Соответственно, инжекция струй небольшого расхода в эти области может существенно повлиять на динамику ПВЯ. В недавнем экспериментальном исследовании продемонстрировано значительное уменьшение пульсаций давления на стенке ОТ за счет радиальной инжекции струй воздуха через отверстия наконечника в аналогичной модели турбины [8].

В данной же работе будет представлено применение вихреразрешающего численного моделирования закрученного потока в воздушной модели гидротурбины Френсиса для исследования влияния радиальной инжекции на структуру потока и пульсации давления на стенке. Расчеты были проведены на неконформной сетке с вращающимся блоком в пакете вычислительной гидродинамики OpenFOAM-11. В сравнении с предыдущими расчетами [9], в текущих используется NCC (Non-Conformal Coupled) модуль, который обеспечивает сохранение массового потока в системе при переходе через интерфейс. Расход на входе в вычислительную геометрию равен 35% от расхода при наилучшей эффективности турбины. Количество, диаметр отверстий а также расход для инжекции соответствуют экспериментальным [8]. Данные результаты будут сравнены с экспериментальными и дополнены новыми продольными положениями отверстий для инжекций.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

Список литературы:

1. Rheingans W. J. Power swings in hydroelectric power plants //Transactions of The American Society of Mechanical Engineers. – 1940. – Т. 62. – №. 3. – С. 171-177.
2. Kurokawa J., Imamura H., Choi Y. D. Effect of J-groove on the suppression of swirl flow in a conical diffuser. – 2010.
3. Tănasă C. et al. A novel passive method to control the swirling flow with vortex rope from the conical diffuser of hydraulic turbines with fixed blades //Applied Sciences. – 2019. – Т. 9. – №. 22. – С. 4910.
4. Lückoff F. et al. Impact of runner crown shape modifications on the onset of the precessing vortex core //IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2022. – Т. 1079. – №. 1. – С. 012051.
5. Resiga R. S. et al. Jet control of the draft tube vortex rope in Francis turbines at partial discharge //23th IAHR Symposium-Yokohama. – 2006.
6. Bosioc A. I. et al. Unsteady pressure analysis of a swirling flow with vortex rope and axial water injection in a discharge cone. – 2012.
7. Müller J. S. et al. On the relevance of the runner crown for flow instabilities in a Francis turbine //IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2022. – Т. 1079. – №. 1. – С. 012053.
8. Litvinov I. et al. Active Control of the Vortex Induced Pressure Fluctuations in a Hydro Turbine Model via Axial and Radial Jets at the Crown Tip //International Journal of Fluid Machinery and Systems. – 2023. – Т. 16. – №. 4. – С. 320-331.
9. Palkin E. V. et al. Numerical simulation of a swirling flow in a Francis draft tube //Journal of Applied and Industrial Mathematics. – 2023. – Т. 17. – №. 1. – С. 156-162.

УДК 536

ЛОКАЛЬНАЯ ЛАМИНАРИЗАЦИЯ УСКОРЕННОГО ПОТОКА КСЕНОНА ПРИ ВДУВЕ ГОРЯЧЕГО ГЕЛИЯ ЧЕРЕЗ ПРОНИЦАЕМУЮ СТЕНКУ

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

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

Использование газа или газовой смеси в качестве рабочего тела в энергетических установках, ввиду его сильной сжимаемости и изменения плотности, может приводить к возникновению локальной ламинаризации потока вблизи стенки при сохранении турбулентного режима течения во внешней части пограничного слоя. Данное явление наблюдается, когда в профиле продольной скорости наблюдается эффект прострела: скорость течения вблизи стенки превышает скорость основного потока [1]. Это проявляется в течениях с сильным продольным градиентом давления, например при течении газа в сужающемся канале.

Локальная ламинаризация приводит к тому, что характеристики потока, такие как коэффициент трения и число Стантона принимают значения между соответствующими величинами для ламинарного и турбулентного режимов [2].

Поскольку на возникновение локальной ламинаризации сильное влияние оказывает профиль продольной скорости, то можно управлять данным явлением, воздействуя на профиль скорости инородным вдувом через стенку или нагревая стенку. Оба перечисленных метода изменяют плотность газовой смеси вблизи стенки.

В данной работе рассмотрено влияние вдува горячего гелия в поток ксенона через проницаемую стенку на характеристики ускоренного пограничного слоя и проанализировано влияние вдува на возникновение и развитие локальной ламинаризации потока.

На рис. 1 представлена схема исследуемого течения. Плоская пластина обдувается потоком ксенона, в начале пластины располагается непроницаемый участок, после которого находится проницаемый участок пластины со вдувом гелий-ксеноновой смеси с фиксированной концентрацией гелия. Проницаемый участок начинается при числе Рейнольдса $\mathrm{Re}_x = 3\times10^5$. На внешней границе пограничного слоя задано условие ускорения потока через параметр ускорения $K = \mu/\rho U_e(dU_e/dx)$, равный $4\cdot10^{-7}$. Рассматривалась двумерная стационарная постановка.

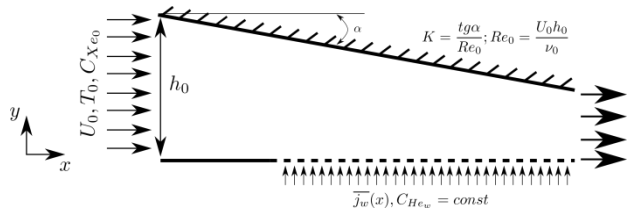


Рис. 1 Схема течения

Задача решалась методом конечных разностей в приближении уравнений пограничного слоя, дополненных уравнением энергии, диффузии и $k-\omega-\gamma$ моделью турбулентности [3]. Свойства смеси и отдельных компонентов рассчитывались по методике [4].

На рис. 2 представлено влияние температуры вдуваемого гелия на значение коэффициента трения. Температура набегающего потока при этом составляет $T_0 = 300\ K$. Независимо друг от друга, отрицательный градиент давления приводит к увеличению коэффициента трения, вдув лёгкого газа через стенку приводит к снижению трения. В рассматриваемых условиях значение коэффициента трения на участке со вдувом выходит на постоянное значение, как и в случае ускоренного течения без вдува [5]. С ростом температуры вдуваемого газа значение коэффициента трения увеличивается практически в 3.5 раза по сравнению со случаем квазиизотермического вдува, аналогично случаю с нагревом стенки без вдува [6].

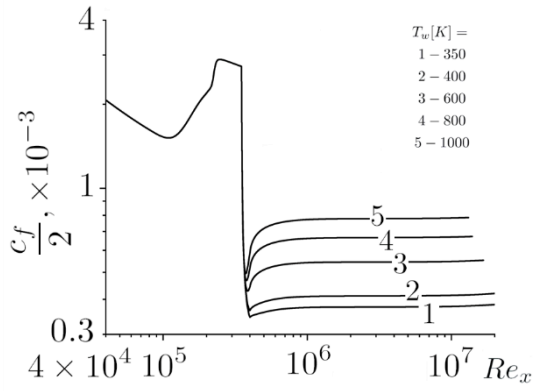


Рис.2 Влияние температуры вдуваемого газа на распределение коэффициента трения при $\overline{j_w} = 1\times10^{-3},\ K = 4\times10^{-7}$.

Список литературы:

1. A.Yu. Sakhnov, V.S. Naumkin, Velocity overshoot within the accelerated subsonic boundary layer over the heated wall // International Journal of Heat and Mass Transfer.-2020.-V.161, № 120249

2. A.Y Sakhnov. Local laminarization at negligible light gas injection into the compressible weakly accelerated boundary layer// International Journal of Heat and Mass Transfer.-2022.-V.182, № 121975

3. X. Ge, S. Arolla, P. Durbin A Bypass Transition Model Based on the Intermittency Function // Flow Turbulence Combust.-2014.- V.93.- pp. 37–61

4. M.S. El-Genk, J.-M. Tournier Noble gas binary mixtures for gas-cooled reactor power plants // Nuclear Engineering and Design.- 2008.- V.238, № 6.- pp. 1353–1372

5. E.P. Volchkov, M.S. Makarov, A.Yu. Sakhnov Boundary layer with asymptotic favourable pressure gradient // International Journal of Heat and Mass Transfer.-2010.-V.53.- pp. 2837–2843

6. A. Yu. Sakhnov Local laminarization within the mild pressure gradient flow over the heated wall // International Journal of Heat and Mass Transfer.-2021.-V.165, №120698.-pp.13

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

УДК 532.517.4, 533.17

УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОДИНАМИКОЙ ПОТОКА В МОДЕЛЬНОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЛИНЕАРИЗОВАННЫХ УРАВНЕНИЙ

Палкин Е.В.[1,2], Проскурин А.В.[3], Мулляджанов Р.И.[1,2]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1
[3] Алтайский государственный технический университет,
656038, Россия, Барнаул, пр. Ленина, 46

Сжигание ископаемого топлива по-прежнему остается основным источником энергии. Вихревые камеры сгорания широко используются в промышленности, транспорте и энергетическом секторе благодаря высокой энергоэффективности [1]. Однако экологические требования продолжают ужесточаться и способствуют разработке технологий низкоэмиссионного горения, например, бедного горения предварительно перемешанной газовоздушной смеси. Эффективность таких камер сгорания зависит от ряда факторов, таких как равномерность подачи и смешения топлива, гидродинамической устойчивости потока [2], особенностей химических реакций, пульсаций тепловыделения и давления. Нестационарные явления, такие как термоакустические пульсации или неустойчивости потока, могут ограничивать возможности безопасной и эффективной эксплуатации такого оборудования [3]. Повысить устойчивость закрученного реагирующего потока и эффективность камеры сгорания можно с помощью методов управления процессами переноса в потоке [4]. Выбор месторасположения актуаторов, возмущающих поток, остается ресурсоемкой задачей оптимизации или зачастую реализуется из общих соображений, что не всегда приводит к оптимальному результату.

В данной работе мы исследуем процессы смешения в закрученном течении модельной камеры сгорания ГТУ при атмосферном давлении при помощи вихреразрешающего моделирования. Геометрия вычислительной области состоит из цилиндрической форкамеры, модельного фронтового устройства и камеры сгорания. Фронтовое устройство включает в себя радиальный завихритель потока. Число Рейнольдса для воздуха, построенное по диаметру выходного отверстия завихрителя 37 мм, составляет 15 000. Численное моделирование методом крупных вихрей несжимаемой среды проведено при помощи пакета с открытым исходным кодом OpenFOAM. Расчетная сетка составлена из гексагональных элементов и неконформных блоков. Ранее для такой геометрии и параметров было проведено исследование активного управления потоком методом осевой инжекции воздуха [5]. В докладе будут проанализированы средние и мгновенные распределения скорости и пульсаций, а также результаты линейного анализа устойчивости в осесимметричной постановке.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

Список литературы:

1. Gas Turbine Combustion/ Lefebvre, A.; PA: Taylor & Francis, 1999.
2. Weber R., Dugué J. Combustion accelerated swirling flows in high confinements //Progress in Energy and Combustion Science. 1992. Т. 18. № 4. С. 349-367.
3. Straub D.L, Richards G.A. Effect of fuel nozzle configuration on premix combustion dynamics //American Society of Mechanical Engineers. 1998.
4. Syred N., Beer J.M. Combustion in swirling flows: a review //Combustion and flame. – 1974. – Т. 23. – № 2. С. 143-201.

УДК 532.1

УПРАВЛЕНИЕ ПРОФИЛЕМ СРЕДНЕЙ СКОРОСТИ И ТУРБУЛЕНТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ПРИ ТЕЧЕНИИ ЖИДКОСТИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ С ЛАМИНАРИЗИРУЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ

Пантелеев С.А.[1], Лукьянов А.А.[1], Зарипов Д.И.[2,3]

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

[2] Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ КазНЦ РАН,
420111, Россия, Казань, ул. Лобачевского, 2/31

[3] Институт математики и механики им. Н.И. Лобачевского КФУ,
420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 35

Задача управления турбулентным потоком и его характеристиками является неотъемлемым этапом проектирования новых образцов техники или совершенствования существующих устройств. Чаще всего ученые и инженеры нацелены на снижение гидравлического сопротивления или интенсификацию теплообмена. Существует множество методов управления потоком [1], отличающихся способом воздействия на поток в зависимости от поставленной цели. Например, для снижения сопротивления какой-либо обтекаемой поверхности (крыла, трубы) в основном используются методы частичной ламинаризации потока в пограничном слое. Существуют методы, благодаря которым удается добиться полной ламинаризации изначально развитого турбулентного течения, например, с помощью использования колеблющихся вдоль потока стенок [2] или пристенного тангенциального вдува жидкости через кольцевой зазор [3]. Эти методы управления потоком являются активными и на практике требуют особого подхода к обслуживанию задействованных механизмов. Пассивные методы отличаются относительной простотой их эксплуатации. К таким методам относится, например, использование супергидрофобных поверхностей [4]. Недавно в работе [5] был предложен метод, основанный на использовании специального устройства, представляющего собой систему направленных по потоку сот, с помощью которого удалось достичь полной ламинаризации турбулентного течения при $Re < 40000$. По мнению авторов работы [5] принцип работы этого устройства заключается в создании М-образного профиля средней скорости на его выходной границе, что, по-видимому, является одним из условий ламинаризации турбулентного течения. Интересно отметить, что течение за устройством не сразу ламинаризировалось, а наблюдался плавный переход от М-образного профиля скорости к параболическому по мере течения жидкости вниз по потоку на расстоянии ~150D, где D – диаметр цилиндрической трубы. В настоящей работе этот метод был взят за основу при исследовании возможности формирования любых профилей средней скорости и турбулентных пульсаций непосредственно за устройством.

Для этого рассматривалось развитое турбулентное течение воды в цилиндрическом канале, изготовленном из прозрачного оргстекла Plexigas XT, длиной l = 4,5м, внутренним диаметром D = 16мм. Использование таких параметров канала позволяет увеличить длину рабочей области до $\frac{l}{D} \approx 280$. Остальные параметры и особенности конструкции экспериментального стенда подробно описаны в работе [6]. Рассматриваемые в настоящей работе соты отличались длиной сот поперек трубы: в отличии от сот, рассмотренных в работах [5,6], соты, расположенные в ядре потока, были короче сот, расположенных вблизи стенок канала. Таким образом, была попытка формирования за устройством профиля скорости близкого к параболическому. Рассматривалось несколько устройств с различными удлинениями сот. В качестве метода измерения использовался высокоскоростной метод Particle Image Velocimetry. Получены и проанализированы профили продольной и радиальной составляющих вектора скорости, а также турбулентных пульсаций, вдоль трубы. Было исследовано изменение профиля продольной составляющей средней скорости вниз по потоку от исследуемого устройства. Для оценки эффективности того или иного устройства был измерен перепад статического давления вдоль рабочего участка.

Список литературы:

1. Kühnen, J., Song, B., Scarselli, D. *et al.* Destabilizing turbulence in pipe flow // *Nature Phys* **14**. 2018. С. 386–390.
2. Scarselli D., Kühnen J., Hof B. Relaminarising pipe flow by wall movement // J. Fluid Mech. 2019. Т. 867. С. 934–948.
3. Kühnen J. и др. Relaminarization by Steady Modification of the Streamwise Velocity Profile in a Pipe // Flow, Turbul. Combust. 2018. Т. 100. № 4. С. 919–943.
4. Rothstein J. P. Slip on superhydrophobic surfaces // Annu. Rev. Fluid Mech. 2010. Т. 42. С. 89–109.
5. Kühnen J., Scarselli D., Hof B. Relaminarization of Pipe Flow by Means of 3D-Printed Shaped Honeycombs // J. Fluids Eng. Trans. ASME. 2019. Т. 141. № 11. С. 1–7.
6. А. А. Лукьянов, М. Ю. Ничик, С. А. Пантелеев, Д. И. Зарипов Экспериментальное исследование влияния специальных устройств на процесс ламинаризации развитого турбулентного течения в трубах // Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики : Сборник трудов: XVII Всероссийской школы-конференции, Шерегеш, 19–24 марта 2023 года.

УДК 532.52

ВЛИЯНИЕ ЗАКРУТКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ ОБЛАСТЕЙ ОТРЫВА ПОТОКА В РАЗВЕТВЛЕННЫХ КАНАЛАХ

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

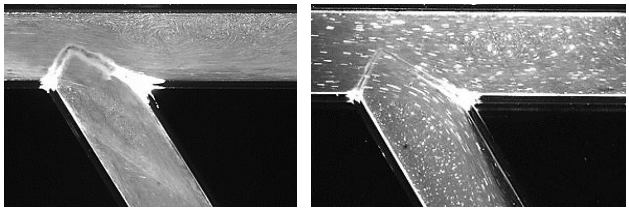
Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ Казанский научный центр РАН,
420111, Россия, Казань, ул. Лобачевского, 2/31

Закрученные отрывные потоки часто встречаются в различных технических устройствах. Наибольшее число исследований влияния закрутки потока на структуру отрывных течений выполнены для турбулентных режимов течения, а ламинарные ограничиваются низкими числами Рейнольдса (Re <800). За рамками этих исследований остались вопросы ламинарно-турбулентного перехода в таких течениях.

Важной областью исследования отрывных течений является гемодинамики сердечно-сосудистой системы. Последние данные свидетельствуют, что в крупных артериях кровоток имеет естественную закрутку [1]. Однако это явление практически не учитывается при изучении гемодинамических процессов и, в частности, при рассмотрении течения в шунтах, обходящие пораженный участок артерии.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования (визуализация и SIV измерения) закрученного потока в разветвляющемся канале. Эксперименты выполнялись в специализированной установке [2], рабочий участок которой имитировал проксимальный анастомоз бедренной артерии «конец-в-бок». В этой же работе представлены результаты исследования течения в таком же рабочем участке без входной закрутки потока. Рабочий участок был изготовлен из прозрачных трубок с внутренним диаметром d = 17.4 мм. Боковое ответвление (шунт) (Q2) располагается под углом 60˚к основному каналу (артерии) (Q1). Значения расходов через Q1 и Q2 было одинаковым. Исследования проводились на стационарном режиме течения при числе Рейнольдса Re = 1460. Лопаточный завихритель с углом лопаток 23˚ в выходном сечении устанавливался за 5 калибров до участка разветвления и обеспечивал степень закрутки потока на входе в разветвление Y = 0.125, что соответствовало естественному значению для гемодинамики артерии.

Результаты визуализации (см. рис.) показали, что структура течения в канале Q2 приблизительно одинакова для обоих случаев: на образующей, прилегающей к тупому углу ответвления, формируется отрывная область. На ее границе периодически образуются крупномасштабные вихревые структуры, которые сносятся вниз по потоку. Влияние закрутки проявляется в некотором изменении пространственного масштаба этой области. Согласно результатам SIV измерений, продольный размер этой области под влиянием закрутки возрастает примерно в 1.5 раза, при этом ее поперечный размер практически не изменяется. Кроме того, в условиях закрутки увеличивается и уровень среднеквадратичных пульсаций скорости на границе этой области.



а *б*

Рисунок. Визуализация стационарного течения в области разветвления каналов при Re = 1460: *а* – без закрутки потока; *б* – с закруткой потока

Наибольшие изменения структуры потока под действием закрутки наблюдаются в ответвлении Q1. Возвратное течение вблизи верхней образующей, которое имело место при отсутствии закрутки, исчезает (см. рис). В центре ответвления образуется область сильно заторможенного потока протяженностью приблизительно 1.5 d – 2.5 d, которая совершает низкочастотные колебания. Формирование зоны торможения в ответвлении Q1 или отрыва потока в ответвлении Q2 может вызывать нарастание возмущений и последующий переход к локальной турбулентности даже при рассматриваемом в настоящем эксперименте числе Рейнольдса Re = 1460. По результатам исследований установлено, что в ответвлении Q1 при отсутствии закрутки потока высокий уровень пульсаций скорости и заполнение высокочастотной области спектра наблюдается в слое смешения на границе отрывной области, что свидетельствует о локальной турбулизации потока. В условиях закрутки признаки ламинарно-турбулентного перехода выявлены в следе за областью торможения. Помимо высокого уровня пульсаций скорости и заполнения высокочастотной области спектра в осциллограммах скорости наблюдается перемежающийся характер течения: чередующиеся по времени участки ламинарного и турбулентного течения. В ответвлении Q2 локальная турбулизация потока появляется только под влиянием закрутки: при ее отсутствии признаков ламинарно-турбулентного перехода не обнаружено.

Работа поддержана РНФ (грант № 22-19-00507)

Список литературы:

1. Агафонов А. В. и др. Гидродинамические особенности закрученного потока крови в левых отделах сердца и аорте //Acta Naturae (русскоязычная версия). – 2021. – Т. 13. – №. 4. – С. 4-16.
2. Molochnikov V. M. et al. Structure of the proximal anastomosis flow in stationary mode at moderate Reynolds numbers // Thermophysics and Aeromechanics. – 2022. – Vol. 29. – №. 6. – PP. 905-911

УДК 532.542.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ ПРИ ПОМОЩИ ОТКРЫТОГО КОДА FLUIDX3D

Плеханов М.С.[1,2], Сальников М.В.[1], Мулляджанов Р.И.[1]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] Новосибирский государственный университет,
630073, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

В последние десятилетия среди методов вычислительной гидродинамики (CFD) активно развивается метод решеточных уравнений Больцмана (LBM). В отличие от стандартных методов CFD, он способен решать широкий класс задач наподобие сосуществования различных компонент жидкости и фазовых переходов. Кроме того, основной привлекательностью данного метода является локальность всех операций и, как следствие, возможность параллельного исполнения алгоритма. Данный свойство позволяет создавать эффективные решатели на основе параллельных вычислительных архитектур и таким образом ускорять вычисления.

В связи со скоростью вычислений LBM естественно возникает идея применения данного метода для исследования турбулентных течений. Это связано с тем, что для сбора статистики турбулентного течения требуется продолжительное наблюдение за течением. Попытки применения LBM для моделирования турбулентных течений показали [1], что данный метод дает результаты, схожие результаты со спектральными методами при значительно меньшей сложности алгоритма.

На данный момент разработаны значительно более эффективные решатели на основе LBM. В числе прочих значительно выделяется открытый код FluidX3D. При помощи введения нового алгоритма распространения популяций Esoteric Pull [2], в этом коде уменьшаются вдвое затраты по памяти, относительно стандартных решателей LBM. Использование графических ускорителей для хранения данных и проведения всех вычислений позволяет достигать самой высокой производительности среди подобных решателей.

Перечисленные преимущества FluidX3D объясняют интерес к данному коду и его применению в научной сфере. В связи с чем была проведена верификация данного кода на ламинарных течениях, а результаты представлены на XVII Всероссийской школе-конференции «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики». Для дальнейшей валидации на турбулентных течениях в данный код были добавлены инструменты для сбора статистики и контроля средней скорости. После чего была проведена верификация данного кода на турбулентном течении в трубе [3]. Результаты моделирования показали, что код воспроизводит верный профиль скорости для $Re_\tau = 180$.

Дальнейшее исследование затрудняла низкая скорость работы алгоритма усреднения поля скорости. В связи с чем был разработан новый инструмент усреднения на основе алгоритма параллельной редукции, который позволил ускорить вычисления более чем в 2 раза.

Далее была проведена верификация не только на течении в трубе, но и на течении в плоском канале и на течении над периодическими холмами (periodic hills flow). Проведены сравнения моментов высших порядков с результатами спектральных методов [4,5]. Кроме того, скорость вычислений позволила впервые проанализировать влияние различных базисов LBM, операторов столкновения и формата хранения данных на качество моделирования. Результаты сравнения с точными расчетами [4,5] позволяют сделать вывод о перспективности кода FluidX3D в области моделирования турбулентных течений.

Работа поддержана в рамках государственного задания ИТ СО РАН

Список литературы:

1. Lammers P. et al. Lattice BGK direct numerical simulation of fully developed turbulence in incompressible plane channel flow //Computers & fluids. – 2006. – Т. 35. – №. 10. – С. 1137-1153.
2. Lehmann M. Esoteric pull and esoteric push: Two simple in-place streaming schemes for the lattice Boltzmann method on GPUs //Computation. – 2022. – Т. 10. – №. 6. – С. 92.
3. Plekhanov M. et al. Numerical simulation of a turbulent pipe flow: FluidX3D LBM validation //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2023. – Т. 459. – С. 03010.
4. Moser R. D., Kim J., Mansour N. N. Direct numerical simulation of turbulent channel flow up to Reτ= 590 //Physics of fluids. – 1999. – Т. 11. – №. 4. – С. 943-945.
5. El Khoury G. K. et al. Direct numerical simulation of turbulent pipe flow at moderately high Reynolds numbers //Flow, turbulence and combustion. – 2013. – Т. 91. – С. 475-495.

УДК 532.54

ВОЗДЕЙСТВИЕ ПЕРЕМЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ТРАНЗИТНОЕ ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ

Полуянов А.О.[1], Колесниченко И.В.[1]

[1] Институт механики сплошных сред УрО РАН,
614018, Россия, Пермь, ул. Академика Королёва, 1

В современных процессах металлургии и энергетики широкое применение получают неинвазивные методы воздействия на рабочую среду – жидкий металл. Примером неинвазивного метода воздействия является генерация вихревого течения с помощью электромагнитной силы.

Применение бесконтактных устройств, которые воздействуют на жидкий металл, актуально на АЭС на быстрых нейтронах в натриевых контурах [1]. При возврате жидкого натрия, охлажденного в измерительных системах, в основной трубопровод, возникают гидродинамические пульсации, а также пульсации температуры. Это может привести к термоциклической усталости и трещинам трубопровода. Чтобы снизить негативные факторы, смеситель разнотемпературных потоков может быть выполнен в виде затопленной струи. Существуют экспериментальные и численные исследования подобных струйных течений [2, 3]. Смешение разнотемпературных потоков жидкого натрия экспериментально исследовалось в [4].

В данной работе проводится численное исследование струйного течения жидкого металла, подвергающегося воздействию переменного магнитного поля. Струйное течение формируется с помощью короткой трубки-вставки, которая располагается с торца цилиндрической ячейки. Ячейка заполнена проводящим жидким металлом и расположена коаксиально с коротким соленоидом. Соленоид подключен к источнику переменного тока и генерирует переменное магнитное поле. Поле индуцирует вихревой ток в среде. Вихревой ток генерирует собственное магнитное поле. При взаимодействии вихревого тока и магнитного поля возникает пинчевая электромагнитная сила, которая сосредоточена в области соленоида и имеет радиальное направление. Описанная выше постановка задачи актуальна с практической точки зрения. Широкое применение нашли индукционные печи [5], электромагнитные перемешиватели и электромагнитные насосы. Электромагнитный насос бегущего поля представляет собой систему соленоидов, соединенных специальным образом. Таким образом, конфигурация с одиночным соленоидом является структурной составляющей такого насоса.

Взаимодействие транзитного течения с вихревым исследуется с помощью математического моделирования. Модель сформулирована на основе уравнений магнитной гидродинамики в электродинамическом приближении. Турбулентность описывается с помощью полуэмпирического подхода. Это допущение позволяет решать задачу электродинамики по поиску распределения электромагнитной силы отдельно от задачи гидродинамики по нахождению поля скорости течения жидкости. Решение задачи проводится в программном пакете Ansys Emag и Fluent.

В работе проведен анализ диаграмм полей и профилей скорости, а также спектральный анализ одномерных сигналов скорости. Пространственный анализ проекций полей скорости на секущие плоскости показал, что в исследуемом диапазоне параметров течение можно разделить на два этапа. На первом этапе преобладает транзитное течение, которое затекает через короткую трубку-вставку. В то время, вихревое течение начинает формироваться под действием электромагнитной силы. На втором этапе развивается колебательный режим, при котором транзитное течение перемешивается. Интенсивность перемешивания зависит от величины силового воздействия. Стоит отметить, что при различном соотношении скоростей затекания жидкости через трубку-вставку и жидкости в ячейке, транзитное течение может иметь преобладающее влияние.

Изучены основные характеристики поля скорости в заданном диапазоне параметров струйного течения. Результаты работы позволят подобрать параметры модели, необходимые для разработки аппаратов, способных воздействовать на неизотермический поток. Результаты будут полезны при решении проблемы возникновения и снижения температурных пульсаций в зоне смешения потоков различной температуры и предотвращения возможных разрушений труб теплоносителя.

Работа выполнена в соответствии с госбюджетным планом № 122030200191-9 и при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках научного проекта «Разработка электромагнитных насосов, реализующих транзитные и спиральные течения жидких металлов в щелевых и цилиндрических каналах устройств металлургии и атомной промышленности» № СЭД-26-08-08-35 от 29.01.2024 г.

Список литературы:

1. Архипов В.М. Техника работы с натрием на АЭС. М. Энергоатомиздат, 1986. 136 с.
2. Krasnov D., Kolesnikov Y., Boeck T. Numerical simulation of electrically conducting jet flow in a straight duct under longitudinal homogeneous magnetic field. Physics of Fluids. 2019. V. 31. 014108.
3. Listratov Ya.I., Razuvanov N.G., Belyaev I.A., Sviridov E.V. Dynamics of submerged jet flow in a pipe in a longitudinal magnetic field. Computational Continuum Mechanics. 2022. V. 15. I. 4. pp. 480-494.
4. Колесниченко И.В., Халилов Р.И., Шестаков А.В., Крылов А.Н., Пахолков В.В. и др. Перемешивание разнотемпературных потоков жидкого натрия в трубопроводе за тройником// Теплоэнергетика. 2023. №3. С. 49-57.
5. Nikulin I.L., Perminov A.V. Mathematical model of the processes of heat and mass transfer and diffusion of the magnetic field in an induction furnace. Journal of engineering physics and thermophysics. 2016. V. 89. No. 2. pp. 397-409.

УДК 533.69

ТЕЧЕНИЕ В СУЖАЮЩЕМСЯ КАНАЛЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕПЛОВЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

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

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

Ускорение потока встречается в различных технических системах. В работе [1] показано, что применение сужающегося канала в испарителе холодильника позволяет увеличить коэффициент теплоотдачи и тем самым уменьшить размеры этого испарителя. В работах [2, 3] показано, что отрицательный градиент давления приводит к уменьшению коэффициента восстановления и, как следствие, к повышению эффективности газодинамической температурной стратификации.

Кейс [4] показал, что при значениях параметра ускорения $K > 3.55\times10^{-6}$ турбулентность полностью подавляется, и течение становится ламинарным. Это также подтверждается современными экспериментами, результаты которых представлены в работе [5]. При меньших значениях параметра ускорения течение остаётся турбулентным, хотя и со сниженным уровнем турбулентности. В работе [6] мы показали, что в пограничном слое на нагретой поверхности в присутствии даже слабого отрицательного градиента давления ($K=4\times10^{-7}$) возникает эффект прострела продольной скорости, который, создавая дополнительное ускорение, подавляет турбулентность вблизи стенки. При этом профиль скорости состоит из ламинарной пристенной части и внешней турбулентной части, переходящей в основное течение. В таких условиях при изменении параметра ускорения и перепада температур между стенкой и основным потоком коэффициент трения и тепловое число Стантона изменяются от значений ламинарного течения до значений турбулентного потока.

Как известно [7], в безградиентном потоке тип тепловых граничных условий не влияет на коэффициент трения. Однако, в работе [8] мы показали, что в условиях сильного ускорения потока ($K=6\times10^{-6}$) с полным подавлением турбулентности коэффициент трения при постоянном тепловом потоке ниже этого параметра при постоянной температуре стенки.

В настоящей работе приведены результаты численного трёхмерного моделирования течения воздуха в сужающемся канале с умеренным ускорением ($K=2.76\times10^{-6}$) и горячей относительно потока нижней стенкой. Геометрия и динамические условия течения соответствовали эксперименту [9] при $Re_0 = 1.58\times10^4$. На нижней стенке канала задавался постоянный тепловой поток 1 кВт/м^2, 3 кВт/м^2 или 6 кВт/м^2, или задавалась постоянная температура стенки 382 K, 632 K или 1251 K. Значения температуры соответствуют максимальным температурам стенки при вышеперечисленных тепловых потоках.

Анализ результатов моделирования показал, что значительное повышение температуры стенки сужающегося канала или теплового потока через неё приводит к возникновению максимума скорости внутри пограничного слоя, расположенного вблизи нагретой поверхности, что является следствием существенной разности плотности воздуха между стеной и основным потоком и наличием продольного отрицательного градиента давления. При этом величина максимума скорости в течении с постоянной температурой стенки выше, чем в течении с постоянным тепловым потоком через стенку.

Отличие в величине максимума скорости при различных типах тепловых граничных условий приводит к более значительному снижению кинетической энергии турбулентности в течении с постоянной температурой стенки. В свою очередь, подавление турбулентности вблизи нагретой стенки приводит к снижению коэффициента трения и теплового числа Стантона.

Таким образом, в условиях умеренного ускорения, когда сохраняется некоторый уровень турбулентности потока, коэффициент трения и число Стантона при постоянной температуре стенки ниже этих параметров при постоянном тепловом потоке.

Список литературы:

1. P.J. Waltrich, J.R. Barbosa Jr., C.J.L. Hermes, C. Melo. Air-side heat transfer and pressure drop characteristics of accelerated flow evaporators // International Journal of Refrigeration. 2011. V. 34. P. 484 – 497.
2. М.С. Макаров, С.Н. Макарова Эффективность энергоразделения при течении сжимаемого газа в плоском канале // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20(6). С. 777 – 787.
3. A. Wortman, A.F. Mills, G. Soo Hoo The effect of mass transfer on recovery factors in laminar boundary layer flows // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1972. V. 15(3). P. 443 – 456.
4. W.M. Kays Convective Heat and Mass Transfer // McGraw-Hill, New York. 1966.
5. C. Bourassa, F.O. Thomas An experimental investigation of a highly accelerated turbulent boundary layer // Journal of Fluid Mechanics. 2009. V. 634. P. 359 – 404.
6. A.Yu. Sakhnov, Local laminarization within the mild pressure gradient flow over the heated wall // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021. V 165 (Part B). Paper No. 120698.
7. Schlichting H., Gersten K. Boundary Layer Theory // 8th ed. Springer: Berlin. –2003.
8. A.Yu. Sakhnov, Influence of thermal conditions on accelerated boundary layer subjected to a wall heating // AIP Conference Proceedings 1648 (ICNAAM14), 850068 (2015). doi: 10.1063/1.4913123
9. Р.Р. Шакиров, И.А. Давлетшин, Н.И. Михеев Кинематическая структура течений и теплоотдача в плоских диффузорном и конфузорном каналах // Теплофизика и аэромеханика. 2022. Т. 29(5). С. 799 — 805.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда

УДК 532.5

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ОБТЕКАНИЯ СИММЕТРИЧНОГО КРЫЛОВОГО ПРОФИЛЯ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ВЕТРЯНЫХ ТУРБИН

Сентябов А.В.[1, 2]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] Сибирский федеральный университет,
660041, Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79

В вертикальных ветроэнергетических установках и в циклических движителях крыловые профили работают в гораздо более широком диапазоне углов атаки, по сравнению с другими приложениями. Это предъявляет особые требования к моделированию турбулентного обтекания лопасти в таких режимах. Кроме того, исследования показали, что наибольшее применение в циклических движителях нашли относительной толстые профили NACA0012 – NACA0018, причем более толстые профили демонстрировали лучшие результаты, так как позволяли затягивать безотрывное обтекание на большие углы атаки.

Для численного моделирования были взяты экспериментальные данные по подъемной силе и силе сопротивления в широком диапазоне углов атаки для двумерных профилей NACA0012 и NACA0015 из [1] при числе Рейнольдса $\mathrm{Re} = 6.8 \cdot 10^5$. Расчеты проводились в несжимаемой постановке. Расчетная сетка состояла из гексаэдральных ячеек, при этом вокруг крыла выделялся пристеночный слой, а в остальной области сетка была неструктурированной. Для базовых сеток безразмерное расстояние до пристеночного узла составляло $y_+ \approx 1$, а количество ячеек вдоль слоя – 200.

Рассмотрение различных расчетных сеток показывает существенное влияние пристеночного слоя на моделирование обтекания крылового профиля. Для наиболее точного определения подъемной силы и сопротивления требуется разрешение расчетной сетки до стенки, а также значительное (100 ячеек и более) число узлов вдоль хорды крыла. Также стоит отметить влияние размера расчетной области, который должен в несколько раз превышать хорду крыла. Несмотря на то, что рассматривались крыловые профили большого удлинения, трехмерные расчеты заметно лучше согласуются с экспериментальными данными, чем двумерные в закритической области углов атаки.

Результаты расчетов также свидетельствуют о значительном влиянии модели турбулентности (Рис. 1, 2). Наилучшие результаты показывает модель k-k_l-ω [2], позволяющая лучше учесть переход ламинарного погранслоя в турбулентный, причем как по подъемной силе, так и по сопротивлению. Также неплохие результаты показывает модель k-ω SST с поправкой Intermitency transition model [3]. RSM приближается к экспериментальным данным по подъемной силе, но сильно завышает сопротивление.

Таким образом, расчетные исследования показывают, что при малых углах атаки все модели турбулентности близки к экспериментальным данным по подъемной силе. Как правило, расчет завышает критический угол атаки и заметно завышает сопротивление (кроме модели k-k_l-ω). Довольно хорошие результаты в докритической области как по сопротивлению, так и по подъемной силе показывает модель k-ω SST с Intermittency transition model, что говорит о заметной роли моделирования ламинарно-турбулентного перехода.

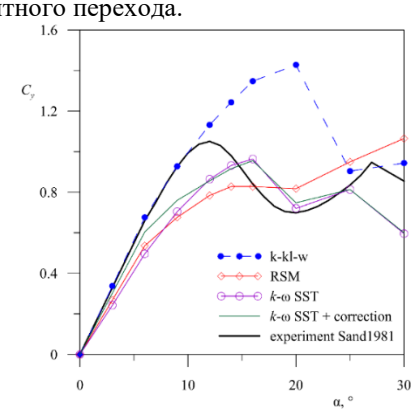


Рис. 1. Коэффициент подъемной силы крыла в зависимости от угла атаки

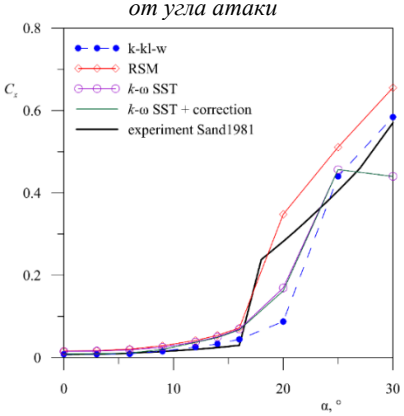


Рис. 2. Коэффициент силы сопротивления крыла в зависимости от угла атаки

Список литературы:

1. Robert E. Sheldahl, Paul C. Klimas (1981) Aerodynamic Characteristics of Seven Symmetrical Airfoil Sections Through 180-Degree Angle of Attack for Use in Aerodynamic Analisys of Vertical Axis Wind Turbines, Sandia National Laboratories energy report.
2. D. Keith Walters and Davor Cokljat. "A three-equation eddy-viscosity model for reynolds-averaged navier-stokes simulations of transitional flows". Journal of Fluids Engineering. 130. December 2008
3. F. R. Menter, R. B. Langtry, S. R. Likki, Y. B. Suzen, P. G. Huang, and S. Volker. "A Correlation-Based Transition Model Using Local Variables: Part I — Model Formulation". (ASME-GT2004-53452) 2004.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

УДК 532.5

ПОСТРОЕНИЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ АЭРОДИНАМИКИ ЦИКЛИЧЕСКОГО ДВИЖИТЕЛЯ

Дектерев Ар. А.[1, 2], Дектерев А.А.[1, 2], Сентябов А.В.[1, 2], Филимонов С.А.[1, 2]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] Сибирский федеральный университет,
660041, Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79

Циклический движитель состоит из нескольких лопастей, которые совершают вращательное движение вокруг оси ротора и в дополнение к этому – качательное движение вокруг своей оси. Такой ротор может использоваться как в качестве движителя летательных аппаратов или судов, так и в качестве вертикальной ветряной турбины [1]. Схема движения лопасти циклического движителя изображена на Рис. 1, на котором точки *O* и *P* являются неподвижными, а связи *R* и *L* обеспечивают вращение и качение лопасти.

Сложное движение лопастей циклического движителя требует построения специальной методики расчета аэродинамики ротора. Для тестирования разработанной методики использовались экспериментальные данные по циклическому движителю из статьи [2]. Геометрия модели движителя представлена на Рис. 2. Расчётная геометрия состояла из следующих частей:

1. Неподвижная область окружающего воздушного пространства.
2. Область ротора, которая рассчитывается во вращающейся системе координат. Вращение задается с постоянной частотой 918 об/мин.
3. Области лопастей, которые совершают качающееся движение относительно центра крепления лопасти и поворачиваются вместе со всем ротором. Движение зоны лопасти задавалось специальным законом, исходя из кинематической схемы (Рис. 1). Взаимодействие между областями лопасти и ротора задавалось методом скользящих сеток.

Предварительные расчеты показывают существенное преимущество трехмерной модели над двумерной по точности расчета тяги движителя и аэродинамических потерь мощности. Трехмерный расчет с разрешением расчетной сетки в погранслое до стенки показывает хорошую точность: 2% по тяге и 3 – 13% по мощности (Табл. 1). На Рис. 3 можно видеть мгновенное поле скорости, а также положения лопастей в различных фазах их движения.

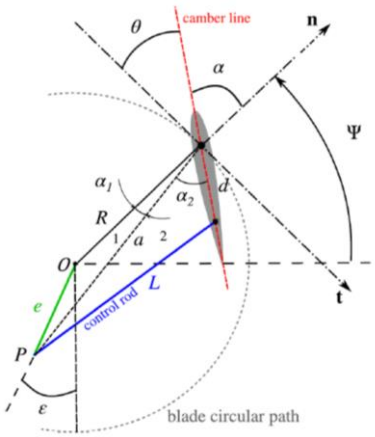


Рис. 1. Кинематическая схема движения лопасти

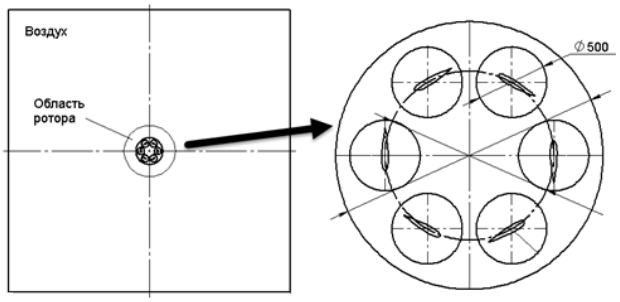


Рис. 2. Кинематическая схема движения лопасти в составе циклического движителя

Таблица 1. Сравнение расчетных характеристик ротора с экспериментальными данными

Сетка	Тяга, Н	Мощность, кВт
1,76 млн.	1970	56
1 млн.	1945	60
0,8 млн.	1942	62
Эксперимент	1981	64

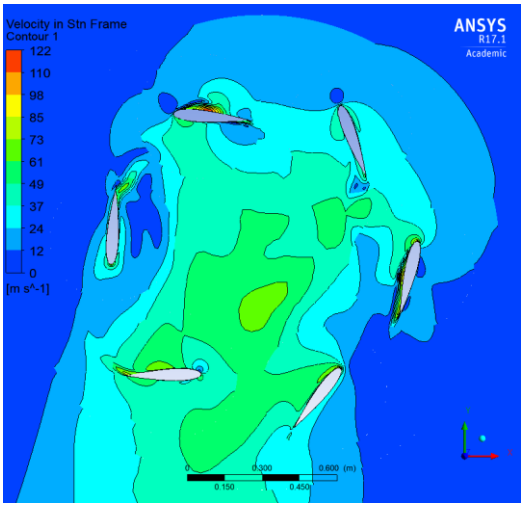


Рис. 3. Мгновенное поле скорости Case3

Список литературы:

1. D.A. Dekterev, A.A. Dekterev, A.S. Lobasov, D.V. Platonov, A.V. Sentyabov. Simu-lation of orthogonal rotors with dynamic pitching blades // Journal of Physics: Conference Se-ries, vol. 1382, 012129, 2019. DOI 10.1088/1742-6596/1382/1/012129
2. Xisto C.M. et al. Parametric Analysis of a Large-Scale Cycloidal Rotor in Hovering Conditions // J. Aerosp. Eng. 2017. Vol. 30, № 1. P. 04016066.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

УДК 536.24

ТЕЧЕНИЕ И ТЕПЛООБМЕН ПРИ ОБТЕКАНИИ КРУГЛОГО ЦИЛИНДРА СО СТЕРЖНЯМИ-ТУРБУЛИЗАТОРАМИ

Сероштанов В.В., Князев С.А., Гусаков А.А.

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

Модернизация теплообменного оборудования актуальна в вопросе повышения энергоэффективности энергетики, машиностроения, транспорта и др.[1]. Вопрос замены оборудования должен быть экономически обоснован. Исследования в области интенсификации теплообмена является актуальными.

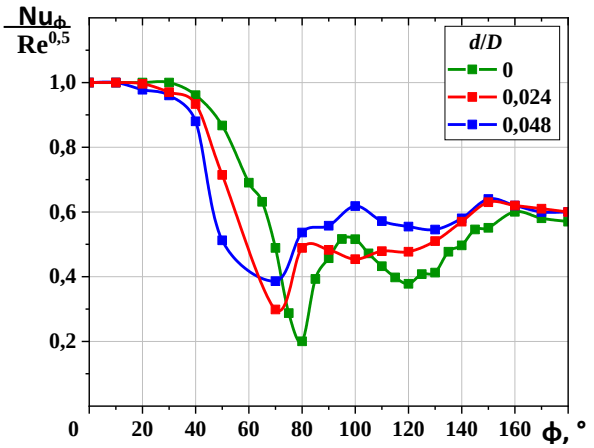
В работе рассмотрено влияние поверхностных интенсификаторов в виде тонких стержней на течение и теплообмен на примере одиночного кругового цилиндра. Стержни-турбулизаторы, установленные на поверхности цилиндра вдоль его образующих, создают вихри, обеспечивая перемешивание в пограничном слое, что приводит к интенсификации теплообмена. В тоже время, влияние перестройки течения в сравнении с гладкой поверхностью, сохраняется на значительном расстоянии по потоку [2], что приводит к изменению сопротивления обтекаемого цилиндра.

Исследования проводились в аэродинамической трубе научно-образовательного центра «Теплофизика в энергетике» СПбПУ. В рабочую зону трубы помещалась экспериментальная модель – полый цилиндр диаметром $D = 66$ мм, выполненный из стального листа толщиной 0,1 мм. Цилиндр обогревается насыщенным водяным паром, поступающим из парогенератора при атмосферном давлении; температура на поверхности цилиндра оставалась постоянной и близкой к 100 °C. Два стержня-турбулизаторы располагались вплотную к образующим цилиндра с различным разнесением от лобовой точки на угол ψ. Для этого стержни закреплялись на кронштейне-рамке, позволяющей применять стрежни различной толщины и угол ψ.

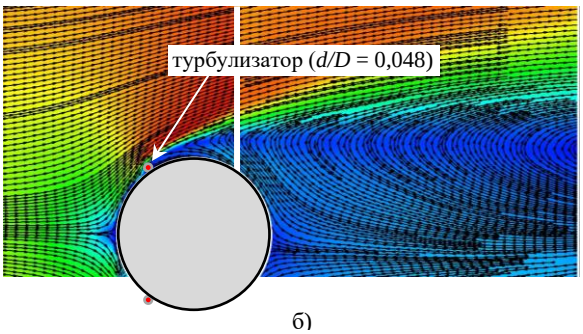
На цилиндре установлен градиентный датчик теплового потока (ГДТП) на основе монокристаллического висмута [3]. Толщина ГДТП 0,2 мм, размер в плане 2,5×2,5 мм; вольт-ваттная чувствительность
S_0 – 8,4 мВ/Вт. Для исследования характера обтекания цилиндра с турбулизаторами используется PIV компании ПОЛИС [3].

В опытах получены значения местного числа Нуссельта $Nu_\varphi = \alpha_\varphi D/\lambda$ на поверхности цилиндра с турбулизаторами. Измерения проводись с использованием стержней диаметра $d = 1{,}6$ и $d = 3{,}2$. Кроме того в опытах варьировался угол разнесения ψ в диапазоне от 15 до 90°.

На рис. 1, а показаны кривые местного числа Нуссельта при установке турбулизаторов на угол $\psi = 60°$ при числе Рейнольдса $Re = 9600$. Минимум КТО сдвигается ближе к лобовой точке, однако кривые спускается более круто. Для представленной геометрии и режима среднее по поверхности число Нуссельта меньше для стержня $d = 1{,}6$ ($d/D = 0{,}024$) на 2,5% и на 4% для $d = 3{,}2$ ($d/D = 0{,}048$) больше в сравнении с гладким цилиндром.



а)



б)

Рис. 1. Распределением местного числа Нуссельта (а) и поле скорости вблизи цилиндра с турбулизаторами (б): Re = 9600, ψ = 60°

Стержни толщиной 3,2 мм (рис. 1, б) оказывает влияние на течение вблизи цилиндра и за ним. Смещается точка отрыва пограничного слоя, перед стержнем образуется застойная зона. Область рециркуляции расширяется вдоль вертикальной координаты.

В результате исследования показана возможность применения стержней-турбулизаторов в задачах интенсификации теплообмена. Предлагаемый экспериментальный подход позволит оценить теплогидравлическую эффективность системы, что дает возможность говорить о ее практической применимости.

Список литературы:

1. Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена: Интенсификация теплообмена: монография / И. А. Попов, Х. М. Махянов, В. М. Гуреев; под общ. ред. Ю. Ф. Гортышова. Казань: Центр инновационных технологий, 2009. — 560 с.
2. Терещенко Ю. М., Ластивка И. А., Волянская Л. Г., Дорошенко Е. В. Моделирование течения на пластине с турбулизатором // ВЕЖПТ. 2011. № 8 (53).
3. Gradient heatmetry advances / S. Z. Sapozhnikov, V. Y. Mityakov, A. V. Mityakov [et al.] // Energies. – 2020. – Vol. 13, No. 23. – P. 6194.

УДК 533.6.01, 62-503.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ КРУПНЫХ ВИХРЕЙ В БЛИЖНЕЙ ОБЛАСТИ СВОБОДНОЙ СТРУИ ПРИ КОЛЬЦЕВОМ И РАДИАЛЬНОМ ПЕРИДИЧЕСКОМ ВДУВЕ НА КРОМКЕ СОПЛА

Сорокин М.И.[1], Кушнарев Д.А. [1,2], Токарев М.П.[1]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Свободные струи являются предметом многих теоретических и экспериментальных исследований [1, 3, 4]. Такие исследования позволяют понять механику массопереноса струйных течений для их применения в химических реакторах, газотурбинных и ракетных двигателях [2]. Такое применение зачастую сопровождается процессом горения компонент смеси на выходе струи, одним из важных факторов которого является перемешивание струи с окружающей средой, за которое отвечают мелкомасштабные вихревые структуры. Интенсифицировать процесс перемешивания можно путем принудительного разрушения крупномасштабных вихревых структур, для этого можно использовать методы пассивного и активного управления. Методы активного управления являются более перспективными, в связи с быстрым развитием программно-аппаратного обеспечения. Реализация механического управления сложно реализуема и требует вмешательства в конструкцию тела. На этом фоне более выигрышным оказывается управление с использованием вторичных потоков (струй).

Для проведения исследований был спроектирован и изготовлен струйный стенд с ударным профилем скорости на выходе из сопла. Особенностью стенда является возможность установки на сопла сменных насадок с различными конфигурациями подвода вторичных струй. В рамках представленной работы были спроектированы и изготовлены, методом 3D печати насадки с кольцевым и радиальным вдувом струй.

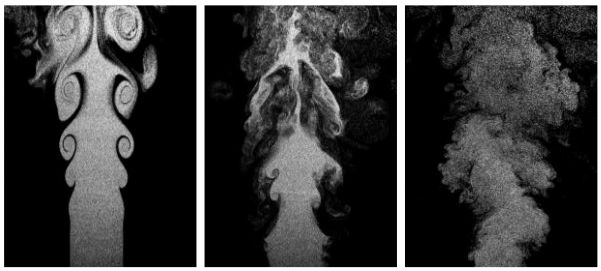


Рис.1. Визуализация струи без управления, с кольцевым вдувом и с радиальным вдувом – соответственно.

В представленной работе исследовалось влияние вторичных струй с коаксиальным и поперечным вдувом на динамику крупных вихрей. Были проведены серии PIV экспериментов с высоким пространственным разрешением (45 пикселей/мм с размером изображения 16 Мп) и скоростной визуализации на частоте 3600 Гц для чисел Рейнольдса основной струи Re = 5000 и Re = 10 000, пример визуализации показан на рисунке 1. Вторичные струи несли в себе 10% и 20% от импульса основной струи на частотах соответствующим числам Струхаля St=0.5 и St=1, а также при постоянном вдуве.

В результате проведенных экспериментов были получены поля мгновенной скорости для выбранных режимов. Была проведена верификация полученных результатов путем сравнения с зарубежными авторами [4]. Сравнение значений скорости на оси струи показано на рисунке 2. Видно, что при радиальном вдуве средняя скорость на оси снижается быстрее, однако при этом поток на выходе из сопла уже является турбулентным, в отличии от конфигурации с кольцевым вдувом.

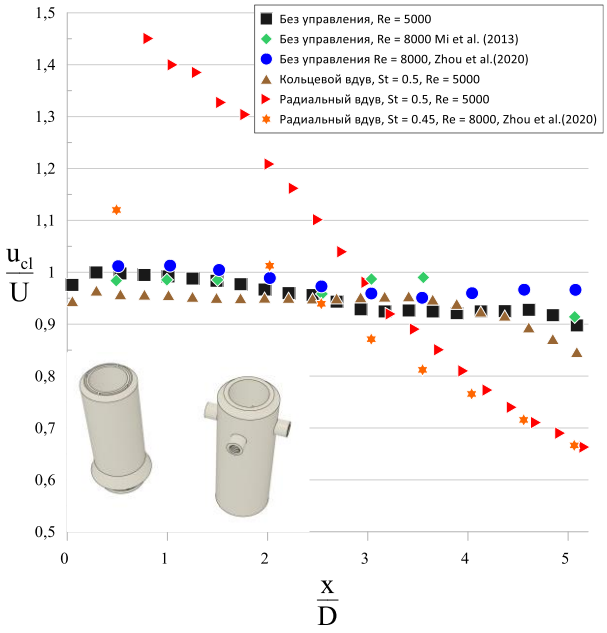


Рис.2. Сравнение значений скорости вдоль оси струи для разных режимов

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-79-30075, https://rscf.ru/project/23-79-33008/

Список литературы:

1. Quinn W. R. Turbulent mixing in a free jet issuing from a low aspect ratio contoured rectangular nozzle //The Aeronautical Journal. – 1995. – Т. 99. – №. 988. – С. 337-342.
2. Knowles K., Saddington A. J. A review of jet mixing enhancement for aircraft propulsion applications //Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering. – 2006. – Т. 220. – №. 2. – С. 103-127.
3. Wu Z. et al. Jet mixing optimization using machine learning control //Experiments in Fluids. – 2018. – Т. 59. – С. 1-17.
4. Zhou Y. et al. Artificial intelligence control of a turbulent jet //Journal of Fluid Mechanics. – 2020. – Т. 897. – С. A27.

УДК 532.5.032

ВЛИЯНИЕ АКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВИХРЕВЫМИ ЯВЛЕНИЯМИ НА СТРУКТУРУ ПОТОКА В МОДЕЛИ ГИДРОТУРБИНЫ

Суслов Д. А.[1, 2], Скрипкин С. Г.[1, 2], Шторк С. И. [1, 2]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Закрученный поток за лопастями рабочего колеса гидротурбины часто сопровождается формированием гидродинамических неустойчивостей в виде прецессии вихревого ядра (ПВЯ). Данные явления приводят к сильным флуктуациям давления, угрожая надежности и безопасности сооружений. Изучение этих явлений представляет сложную задачу из-за их трехмерной, турбулентной и изменчивой структуры. Механизмы образования этих вихревых структур и возникновения пульсаций давления остаются недостаточно ясными. Поэтому управление этими вихревыми явлениями для обеспечения стабильной работы гидроэнергетического оборудования является актуальной задачей гидроэнергетики.

Для управления амплитудно-частотными характеристиками вихревых структур зачастую применяются методики, основанные на инжекции дополнительной струи воды через центр тела обтекания рабочего колеса турбины. Но несмотря на эффективность такого подхода в устранении асинхронных пульсаций давления, в потоке остаются опасные синхронные пульсации давления с некоторой амплитудой. Кроме того, для подавления вихревого ядра требуется большой расход струи, что приводит к потерям эффективности гидротурбины. Вдобавок, в литературе практически нет информации о влиянии пространственного распределения струи и угла ее направления на эффективность управления вихревыми структурами. Однако, численное моделирование показало [1], что положение и угол направления струи имеют значительное влияние на эффективность управления вихревыми явлениями.

Цель данной работы заключается в изучении влияния возмущения потока управляющей струей на структуру течения в ближнем и дальнем следе за рабочим колесом воздушной модели гидротурбины.

Для проведения экспериментального исследования был использован аэродинамический стенд с системой из двух последовательно расположенных аксиальных завихрителей. Это позволило выполнить симуляцию распределений скорости, подобных тем, которые возникают в реальных гидротурбинах, и получить с высокой точностью требуемое распределение скоростей на выходе с рабочего колеса.

В ходе работы была адаптирована и усовершенствована технология управления потоком с помощью возбуждения нестационарной струей азимутальной моды ПВЯ. Проведено сравнение различных способов подачи струи при одновременном анализе пульсаций давления и распределений скоростей за рабочим колесом. Подача струи осуществляется путем модификации тела обтекания специальным актуатором, через который подается расход воздуха. Актуаторы позволяют подавать струю радиально, аксиально и сочетать два этих направления. Варьирование режимов работы аэродинамического стенда позволило охватить широкий диапазон работы гидротурбины.

Получение средних распределений скорости в широком диапазоне работы модели гидротурбины на воздушном стенде методами выполнено методом цифровой трассерной визуализации (PIV) с частотой съемки 100 Гц, параллельно с этим шла регистрация сигнала давления. Для регистрации сигнала давления были установлены четыре акустических датчика за рабочим колесом для измерения пульсаций давления. Датчики установлены через четверть круга вблизи рабочего колеса, с целью выделения первой азимутальной пространственной моды, отвечающей за ПВЯ в потоке.

Для анализа полей скоростей в работе показано разложение на ортогональные моды (POD-анализ), который позволил оценить вклад ПВЯ в основные энергонесущие моды на уровне 40-60% от общей кинетической энергии турбулентности, также анализ позволил оценить эффективность разрабатываемого метода управления. Был апробирован спектральный POD (SPOD) анализ, позволяющий выделить не только пространственную структуру вихревых явлений, но и изучить её динамику во времени.

Результаты исследования говорят о том, что эффективность подавления вихревых структур зависит как от угла направления управляющей струи, так и от ее расхода. Определенные актуаторы могут даже увеличивать амплитуду ПВЯ. На основе выявленных особенностей и пространственной характеристики вихревых структур в присутствии управления получено, что радиальный способ подачи струи с расходом в 2-3% от расхода основной среды является оптимальным способ подачи с точки зрения наиболее эффективного управления вихрями.

Результаты исследования помогут расширить диапазон устойчивой работы гидротурбин и повысить безопасность гидроэлектростанции, снижая вероятность появления усталостных разрушений в элементах гидроэнергетического оборудования.

Список литературы:

1. Javadi A., Nilsson H. Active flow control of the vortex rope and pressure pulsations in a swirl generator //Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. – 2017. – Т. 11. – №. 1. – С. 30-41.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН (ЕГИСУ НИОКР - 121031800229-1).

УДК 532.559.3

ФЛУКТУАЦИИ СКОРОСТИ В НАПОРНОМ Y-ТРОЙНИКЕ

Федоренко В.А.[1], Леманов В.В.[1]

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

Известно, что тройники широко используются на трубопроводах для систем вентиляции и воздухоснабжения. Напорный Y - тройник – соединительная деталь трубопровода с одним входом и двумя выходными отверстиями. При проектировании трубопроводов с тройниками одной из важных задач является определение местных гидравлических сопротивлений [1,2]. Потери полного давления наиболее подробно исследованы на турбулентном режиме течения, так как он наиболее часто встречается в практике [1]. Считается, что ламинарные режимы хорошо моделируются с помощью широко известных коммерческих кодов. В то же время режимы ламинарно-турбулентного перехода в тройниках изучены недостаточно [2,3]. В настоящей работе проведено экспериментальное исследование трех режимов течения напорного круглого тройника в диапазоне чисел Рейнольдса Re=400-7200. Основное внимание при этом уделено измерению скорости и пульсаций скорости как на входе, так и на двух выходах тройника.

В работе использовался Y-тройник из пластика, изготовленный на 3-d принтере с внутренними диаметрами на входе и на выходе d = 8 мм и углом разводки 50º, длина выходной части 60 мм. Экспериментальная установка состоит из гидравлической и измерительной частей.

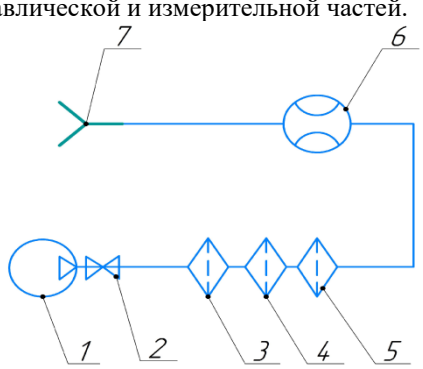


Рис. 1. Схема гидравлической части установки.

Принцип работы стенда заключается в следующем: воздух нагнетается компрессором СБ4/С-200.LB40 (1,2) далее фильтровался (3-5) и затем поток, управляемый расходомером Bronkhorst Mass View (6), подавался из круглой трубки (d = 8 мм) на вход Y – тройника (7). Для измерения скорости и пульсаций скорости потока использовался термоанемометр постоянной температуры фирмы «Disa» в составе: миниатюрный зонд DISA55P11, мост СТА DISA55M, линеаризатор DISA55D10, вольтметры средних и среднеквадратичных значений DISA55D31 и DISA55D35. По показаниям вольтметров определялись значения скорости и пульсаций скорости с учетом тарировки по закону Кинга. Цифровой осциллограф RIGOL DS1054 использовался для наблюдения сигнала термоанемометра в режиме реального времени. Затем при помощи программы Ultra Scope данные с осциллографа передавались на компьютер и обрабатывались в программе Excel. В частности строились графические зависимости пульсаций скорости (u) и степень турбулентности (Tu) от Re. Здесь Re=Ud/ν, Tu = u/U*100%, где U– среднерасходное значение скорости на входе в тройник, u - среднеквадратичное значение скорости, d – диаметр входного отверстия, ν – вязкость воздуха.

В опытах выполнены измерения скорости и пульсаций скорости как на входе, так и на двух выходах Y - тройника в диапазоне чисел Рейнольдса Re=400-7200. Эти данные в работе представлены в виде графической зависимости пульсации скорости потока и степени турбулентности от числа Рейнольдса. Для случая измерения на входе в тройник режим перехода к турбулентности наблюдается в узком диапазоне Re=3272-3458, который соответствует известным данным для перехода в круглой трубе [4]. На выходе из тройника можно выделить три режима течения: ламинарный участок при Re<1003, переходный – Re=1100-3500, турбулентный – Re>3500. Низкое число Рейнольдса перехода для напорного тройника с незакругленной кромкой, по-видимому, связано с областью разделения потока. Таким образом, турбулизация потока при наличии Y – тройника происходит не при числах Рейнольдса Re=3272-3458, характерных для прямых труб [5], а при меньших Re=1100, соответствующих увеличению флуктуаций скорости в данном тройнике.

Опытные данные, полученные для Y - тройника в представленной работе, могут быть использованы для валидации моделей расчета сетей и магистралей при подаче различных газов.

Список литературы:

1. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям/Под ред. М. О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992.-672 с
2. Hayes R.E., Nandakumar K., Nasr-El-Din H. Steady laminar flow in a 90 degree planar branch // Computers Fluids. 1989. V.17. P.537-553.
3. Sochi T. Fluid flow at branching junctions // Int. J. Sci. Res. 2014. V.3. P.325–330.
4. Леманов В.В., Лукашов В.В., Шаров К.А. Переход к турбулентности через перемежаемость в инертных и реагирующих струях // Изв. РАН.: Механика жидкости игаза. 2020. № 6. С. 50–59.
5. Mullin T. Transition to turbulence in a pipe // Ann. Rev. Fluid Mech. 2011. V. 42. P. 1–24.

УДК 533.6.011.3

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ PIV-МЕТОДА ДЛЯ ВЕРИФИКАЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБТЕКАНИЯ ТЕЛ С ДЕМПФИРУЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Чукалин А.В.[1], Ковальногов В.Н.[1], Петров А.В. [1], Шеркунов В.В. [1]

[1]Лаборатория междисциплинарных проблем энергетики
Ульяновского государственного технического университета,
432027, Россия, Ульяновск, ул. Северный Венец, 32

Улучшение аэродинамической эффективности и снижение потерь энергии газовых потоков в процессе обтекания тел является актуальным направлением в развитии экологически чистой и ресурсосберегающей энергетики.

Для воздействия на пограничный слой разработан ряд систем управления пограничным слоем (УПС) и на сегодняшний день они продолжают совершенствоваться. Системы УПС подразделяются на активные и пассивные системы [1], отличающиеся концепцией воздействия. С середины 70-х годов накоплен достаточно большой опыт по изучению возможности снижения турбулентного трения с помощью различных как пассивных, так и активных методов управления турбулентными сдвиговыми течениями, обзор которых приведен в работах [2-5].

Для точного получения результатов при использовании подходов к моделированию пограничного слоя с внешними воздействиями необходимо иметь точные зависимости, отражающие воздействие тех или иных сил на преобразование пограничного слоя.

Проведены экспериментальные исследования демпфирующей поверхности позволяющей ламинаризировать пограничный слой и затягивать ламинарно-турбулентный переход, за счет подавления турбулентной энергии. Результаты позволили расширить базу данных и усовершенствовать полуэмпирическую модель пограничного слоя. Тестировались демпфирующие полости объемом от 0,18 см^3 до 0,6 см^3 в диапазоне чисел Рейнольдса от $5{,}8 \cdot 10^5$ до $1{,}91 \cdot 10^6$ (определяемое по длине поверхности). Экспериментальные исследования при дозвуковых течениях газа проводились с использованием измерительного комплекса «Полис» методом Particle Image Velocimetry (PIV) [6]. Анализ распределения скоростей с помощью велосиметрии изображений частиц показал, что в пристенной области наблюдается устойчивое снижение уровня завихренности, а также увеличение продольной скорости в дозвуковом потоке газа в широком диапазоне чисел Рейнольдса (Re). Выявлена зависимость эффективности демпфирующих полостей относительно чисел Рейнольдса. Произведена количественная оценка эффективности технологического потенциала демпфирующей поверхности на управление пограничным слоем в дозвуковых потоках при наличии интенсивных воздействий.

Эксперименты проводились в дозвуковой малотурбулентной аэродинамической трубе, имеющей степень турбулентности набегающего потока не превышающую величину порядка 2 %. Исследования проводились в специализированном рабочем участке с размерами 350×350×700 мм. Оснащение аэродинамической трубы позволяет варьировать скоростью потока от 2 м/с до 60 м/с с точностью до 0,1 м/с посредством управления электродвигателем вентилятора через частотный преобразователь. В измерительный комплекс «ПОЛИС» входит двойной импульсный Nd:YAG лазер с объективом для формирования лазерного ножа. Для регистрации трассерных картин использовалась высокоскоростная камера IMPERX B2720 снабженная длиннофокусным макрообъективом. Управление комплексом и обработка изображений реализовано с использованием программного продукта Actual Flow. Засеивание трассерами производилось с помощью генератора аэрозоля GL 120 v73 (частицами порядка 1-3 мкм). Во входной и выходной части рабочего участка смонтированы трубки Пито (Исполнение П) для контроля скорости воздушного потока посредством цифрового манометра RGK PM-12 с допускаемой приведенной погрешностью ± 0,5 %.

Установлено, что при обтекании демпфирующей поверхности с полостями объемом 0,4 см^3 воздушным потоком с турбулентным пограничным слоем Re = $1{,}91 \cdot 10^6$ возможно снижение коэффициента сопротивления трения на поверхности до 21 %. Кроме того, в следствие снижения уровня завихренности (фиксируемой PIV) высота пограничного слоя снижается. Векторное поле скоростей в пограничном слое приобретает более выраженное сонарпавленное движение потоку, снижаются поперечные пульсации скорости. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности демпфирующей поверхности. Варьирование объемом полостей и количеством перфорационных отверстий позволяет расширить диапазон эффективного воздействия на пограничный слой.

«Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01173, https://rscf.ru/project/23-79-01173/»

Список литературы:

1. Lofdahl, L.MEMS applications in turbulence and flow control // Progress in aerospace Sci. - 1999. - Vol. 35. – P. 101-203.
2. Bushnell, D. M. 1983: Turbulent drag reduction for external flows. AIAA Paper 83- 0227.
3. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое / С. С. Кутателадзе, А. И. Леонтьев Изд. 2-е., перераб. Москва: Энергоатомиздат, 1985. 318 с.
4. Корнилов, В. И. Проблемы снижения турбулентного трения активными и пассивными методами (обзор)// Теплофизика и аэромеханика. – 2005. – Т. 12, № 2. – С. 183-208.
5. Современное состояние теории управления пограничным слоем / В.Б. Амфилохиев, Л.С. Артюшков, Б.А. Барбанель [и др.]. – Санкт-Петербург: Малахит, 2000. - 415 с.
6. Применение методов цифровой трассерной визуализации для диагностики турбулентного пограничного слоя / А. В. Бильский, О. А. Гобызов, В. И. Корнилов, Д. М. Маркович // Теплофизика и аэромеханика. – 2012. – Т. 19, № 4. – С. 401-413.

УДК 532.5.032, 532.582.31, 532.542

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР КОЛЕБЛЮЩЕЙСЯ СТРУИ В ЩЕЛЕВОМ ЗАЗОРЕ

Шестаков М.В.

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

Течения в щелевых каналах и зазорах встречаются во множестве технических и энергетических приложений. Структура течения в каналах, содержащих щелевой зазор, характеризуется сильными квазипериодическими колебаниями потока в области зазора. Колебания скорости связаны с взаимодействиями между вихревыми структурами турбулентных сдвиговых течений, развивающихся на противоположных сторонах зазора. Вихревые структуры в щелевых зазорах в составных каналах обнаружили Краусс и Мейер [1, 2]. В частности, подобные вихревые структуры формируются в щелевых зазорах плотно упакованных пучков стержней и являются причиной сильного межканального перемешивания [3]. Вихревые структуры, формирующие вихревые дорожки наподобие дорожки вихрей Кармана, могут приводить к синхронизации межканального обмена в результате образования вихревой сети [4]. Динамика вихревых структур приводит к крупномасштабным квазипериодическим колебаниям продольной и поперечной скорости в щелевых зазорах между стержнями.

Вихревые дорожки в каналах различной формы поперечного сечения изучались многими авторами с использованием различных методов, включая теоретические, экспериментальные и расчетные. Однако зависимости частоты, длины волны и интенсивность возникающих вихрей, а также их пространственной топологии от геометрии каналов и других влияющих факторов исследованы лишь частично. Несмотря на большое количество численных работ по исследованию течений в зазоре, трехмерная структура течения в щелевом зазоре в настоящее время остается во многом не изучена. Знание характеристик данных вихревых структур и особенностей турбулентного потока в щелевых зазорах пучков стержней имеет важное значение для точного прогнозирования характеристик энергетической ядерной установки в условиях проектирования и постулируемых авариях.

Целью данной работы является экспериментальное исследование количественных характеристик вихревых структур и их влияния на межканальный массообмен и перемешивание за счет управляемой генерации вихревых структур в щелевых зазорах.

В данной работе исследуется пространственная структура турбулентного течения, формирующегося в щелевом зазоре канала П-образной формы в результате развития колеблющейся струи. В качестве генератора колебаний струи в щелевом канале использовался струйный осциллятор с двумя каналами обратной связи. Данный осциллятор имеет простую линейную зависимость частоты колебаний струи от расхода жидкости, а также не содержит движущихся частей [5]. Струйный осциллятор позволяет генерировать самоподдерживающиеся автоколебания струи, что позволят генерировать вихревые структуры в зазоре на заданной частоте.

Эксперименты проводились на гидродинамическом стенде, оснащенном системами контроля расхода и температуры жидкости. Рабочий участок представлял собой составной канал, состоящий из двух прямоугольных каналов, соединённых щелевым зазором. В щелевой зазор устанавливался струйный осциллятор. Число Рейнольдса определялось по гидравлическому диаметру и среднерасходной скорости и варьировалось в диапазоне от 5000 до 20000. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода. Для измерения мгновенных полей скорости использовалась высокоскоростная измерительная PIV система «Полис», состоящая из Nd:YLF New wave Pegasus лазера, камеры Photron FASTCAM SA5, объектива Nikon и синхронизирующего процессора BNC. Измерения мгновенных полей скорости проводились в срединной плоскости щелевого зазора. Толщина лазерного ножа в измерительной области составила 0,5 мм. Расчет мгновенных полей скорости производился при помощи программного обеспечения «ActualFlow».

Проведено экспериментальное исследование динамики вихревых структур, образующихся в щелевом зазоре в результате взаимодействия колеблющейся струи со спутными течениями. На основе экспериментальных данных мгновенных полей скорости рассчитаны турбулентные характеристики течения. Анализ экспериментальных данных показал, что в исследуемом диапазоне чисел Re применение струйного осциллятора позволяет интенсифицировать смешение между боковыми потоками через щелевой зазор.

Список литературы:

1. Krauss T., Meyer L. Characteristics of turbulent velocity and temperature in a wall channel of a heated rod bundle // Exp. Therm. Fluid Sci. 1996. Vol. 12. P. 75–86.
2. Krauss T., Meyer L. Experimental investigation of turbulent transport of momentum and energy in a heated rod bundle // Nucl. Eng. Des. 1998. Vol. 180. P. 185–206.
3. Meyer L. From discovery to recognition of periodic large scale vortices in rod bundles as source of natural mixing between subchannels — A review // Nucl. Eng. Design. 2010. Vol. 240. P. 1575–1588.
4. Tavoularis S. Rod bundle vortex networks, gap vortex streets, and gap instability: A nomenclature and some comments on available methodologies // Nucl. Eng. Design. 2011. Vol. 241. P. 2624–2626.
5. Ostermann F. et. al. Properties of a sweeping jet emitted from a fluidic oscillator // J. Fluid Mech. 2018. Vol. 857. P. 216 –238.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (№ 24-29-20223, https://rscf.ru/project/24-29-20223/) и финансовой поддержки Правительства Новосибирской области (соглашение № р-100 от 22.03.2024).

УДК 532.5.032, 532.582.31, 532.542

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОТЫ ЩЕЛЕВОГО КАНАЛА НА ДИНАМИКУ ТЕЧЕНИЯ КОЛЕБЛЮЩЕЙСЯ СТРУИ

Шестаков М.В., Маркович Д.М.
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

В настоящее время в качестве методов интенсификации процессов тепломассообмена широко используются вихрегенераторы на примере винглетов, регулярных траншей, пространственных лунок, группы цилиндров, полусфер и т.д. Данные методы позволяют интенсифицировать процессы теплообмена за счет генерации продольных вихревых структур. Однако в большинстве случаев применение указанных интенсификаторов теплообмена сопровождается повышением гидравлических потерь, в некоторых случаях растущими с опережающим темпом по отношению к увеличению теплоотдачи.

В данной работе мы используем жидкостный осциллятор для управляемой генерации продольных вихревых структур, формирующихся при истечении колеблющейся струи в щелевой канал. Жидкостный осциллятор позволяет создать самоиндуцированную и самоподдерживающую пространственно колеблющуюся струю в широком диапазоне чисел Рейнольдса. Данный подход может иметь преимущество по сравнению со стационарно установленными вихрегенераторами, так как позволяет увеличить область воздействия и управлять процессами генерации продольных вихревых структур, не приводя к значительным гидродинамическим потерям.

Проведённые нами исследования показали, что при соотношении высоты канала к ширине горловины выходного сопла струйного осциллятора h/d = 1 истечение колеблющейся струи в щелевой канал сопровождается формированием крупномасштабных квазидвумерных вихревых структур [1]. Влияние ограничивающих стенок канала приводит к уменьшению максимального угла отклонения струи. Значения максимального угла отклонения слабо зависят от числа Re и являются намного меньшими по сравнению с имеющимися в литературе значениями. В исследуемом диапазоне чисел Re уменьшение высоты щелевого канала обеспечивает штатный режим работы струйного осциллятора, что позволяет генерировать колебания струи с заданной частотой. Однако есть несколько экспериментальных работ в которых показано, что в определённом диапазоне чисел Рейнольдса колебательные движения струи, генерированные струйным осциллятором, прекращаются вследствие устойчивого присоединения струи к стенке струйного осциллятора в одном из крайних положений [2, 3]. Авторы связывают это присоединение с проявлением эффекта Коанда, усиливающимся за счет формирования интенсивной вихревой структуры. Однако данные, полученные в работах [2, 3], не дают четкого представления о механизме ее формирования. Кроме того, не приводится анализ влияния геометрических соотношений ограниченной области, приводящих к присоединению струи и прекращению штатной работы осциллятора.

Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование влияния высоты щелевого канала на динамику течения колеблющейся струи, генерируемой струйным осциллятором с двумя каналами обратной.

Эксперименты проводились на гидродинамическом стенде, оснащенным системами контроля расхода и температуры жидкости. Рабочий участок представлял собой щелевой канал, образованный двумя плоскопараллельными оптическими окнами, установленными на расстоянии h друг от друга. Модель жидкостного осциллятора толщиной h устанавливалась внутрь щелевого канала. Ширина горловины выходного сопла осциллятора была постоянной и равнялась d = 4 мм. Высота канала h варьировалась от 2 мм до 8 мм с шагом 2 мм, что обеспечивало диапазон соотношений d/h от 0.5 до 2. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода. Число Re, рассчитанное по ширине горла осциллятора d и среднерасходной скорости, варьировалось в диапазоне от 1500 до 8000. Измерения проводились при помощи высокоскоростной измерительной PIV системы «Полис» (Nd:YLF лазер New wave Pegasus, камера Photron FASTCAM SA5, объектив NIKKOR Micro Nikon и синхронизирующий процессор BNC). Толщина лазерного ножа в измерительной области равнялась 0,7 мм. Измерительная область, располагалась в средней плоскости щелевого канала. Обработка PIV изображений проводилась при помощи программного обеспечения «ActualFlow».

Проведено экспериментальное исследование влияния высоты щелевого канала на динамику вихревых структур колеблющейся струи, генерируемой струйным осциллятором. Анализ последовательных картин течения показал, что истечение колеблющейся струи в щелевой канал сопровождается генерацией интенсивных крупномасштабных вихревых структур на частоте колебания струйного осциллятора в исследуемом диапазоне соотношений d/h. Изменение соотношений d/h не изменяют линейную зависимость частоты колебания струи от расхода жидкости, подаваемого на вход осциллятора.

Список литературы:

1. Шестаков М.В., Маркович Д.М. Исследование динамики крупномасштабных вихревых структур в колеблющейся струе, истекающей в щелевой канал // Теплофизика и аэромеханика. 2022. Т.29. № 5. С. 785-791.
2. Mohammadshahi S. et.al. Flow characteristics of a wall-attaching oscillating jet over single-wall and double-wall geometries // Exp. Therm. Fluid Sci. 2020. Vol. 112, No. 1. P. 110009-1–110009-13.
3. Samsam-Khayani H., et.al. Experimental study on physical behavior of fluidic oscillator in a confined cavity with sudden expansion // Appl. Sci. 2020. Vol. 10. P. 8668-1– 8668-17.

Исследование выполнено за счет гранта РНФ (№ 19-79-30075, https://rscf.ru/project/23-79-33008/)

УДК 532.542:536.7

ЭНЕРГИЯ ВРАЩЕНИЯ КАК МЕРА ИНТЕНСИВНОСТИ ЗАКРУТКИ ПОТОКА

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

Вихревое движение широко используется во многих технологических процессах для управления тепло-массопереносом. Интенсивность вращения обычно характеризовалась интегральным параметром, предложенным в работе [1]. Хотя этот критерий может использоваться только при наличии аксиального потока не близкого к нулю. Так же в этом случае отсутствует информативность о структуре течения, перераспределению локального момента импульса по длине канала.

Безразмерное выражение для вихревой энергии может быть получено из известного соотношения, которое преобразуется следующим образом

$$\frac{\partial P}{\partial r} = \rho \frac{V_\varphi^2}{r} \quad \rightarrow \quad \frac{r}{P}\frac{\partial P}{\partial r} = kM_\varphi^2 \qquad (1)$$

где $M_\varphi = V_\varphi / a$, $a = \sqrt{kP/\rho} = \sqrt{kRT}$ – скорость звука, k – коэффициент адиабаты.

В качестве оценки локальной интенсивности закрутки можно использовать безразмерную величину, записанной в виде

$$I_\varphi = kM_\varphi^2 \qquad (2)$$

Ранее автором [2] для смешения коаксиальных потоков была показана аналогия в сечениях профилей V_φ^2 и безразмерной температуры. Они хорошо обобщаются кривой Гаусса и кривой Вигхардта, близкие между собой.

Отмеченная аналогия позволила сопоставить I_φ, точнее её максимальное значение по радиусу, с изменением по длине канала с эффективностью закрученной завесы. Для обобщения вводимого параметра были использованы критериальные зависимости, полученные для систем охлаждения [3].

$$K_{Tu} = \Psi_T \cdot Re_x / [Re_s\,(\mu_s / \mu_o)\,(1 - s / D_k)]^{1.25},$$

где с помощью Ψ_T осуществляется поправка на неизотермичность потоков:

$$\Psi_T = \left(\frac{2}{\sqrt{\overline{\psi_T}}+1}\right)^2; \qquad \overline{\psi_T} = \frac{T_s}{T_o}$$

Безразмерная температура стенки (эффективности охлаждения) для турбулентного режима течения записывается в виде:

$$\theta \equiv (T_o - T_w) / (T_o - T_s) = \{\, 1 + 0.25 \cdot \Psi_T \cdot K_{Tu} \,\}^{-0,8} \qquad (4)$$

Результаты сопоставления обоих параметров эффективности охлаждения и максимальной интенсивности закрутки представлены на рис. 1, где за $I_{\varphi,o}$ обозначено максимальная величина I_φ в начальном сечении. Для сравнения на рисунке нанесены опыты с тепловой завесой (точки 5,6), которые удовлетворительно описываются зависимостью Кутателадзе-Леонтьева (4).

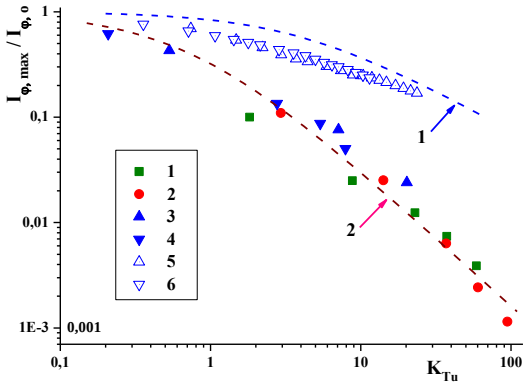


Рис. 1. Обобщение результатов расчета $I_{\varphi,\,max}$ в переменных газовых завес. 1-2 из [4], 3-6 - [2]; 5-6 точки θ. Кривые: 1 - зависимость (4), 2 - (5).

На рис. 1 точками 1-4 представлена интенсивность закрутки для различных начальных условий и, как видно, успешно обобщается единой зависимостью, указанной ниже.

$$I_{\varphi,\,max} / I_{\varphi,\,o} = (1 + 1.4 \cdot \Psi_T \cdot K_{Tu})^{-1.3} \qquad (5)$$

В опытах [4] температуры основного потока отличались соответственно 290 и 835 К. Учет неизотермичности с помощью Ψ_T привел к обобщению точек на графике.

Отличие на рисунке распределения I_φ и θ вызвано разными условиями на стенке: тепловая энергия из-за адиабатичности поверхности не имеет потерь, тогда как скорость на стенке тормозится, понижая и I_φ.

Информация о вращательной энергии в локальных точках в виде $I_\varphi = kM_\varphi^2$, снижение её максимальной интенсивности от входа и далее по длине канала аналогична безразмерной температуре - эффективности охлаждения. Подобие I_φ и θ в случае смешения в ограниченном закрученном потоке можно описать соответствующими уравнениями (4) и (5).

Все результаты получены в рамках Государственного задания ИТ СО РАН (121031800217-8).

Список литературы:

1. Chigier N.A. and Beer J.M. Velocity and static pressure distributions in swirling air jets issuing from annular and divergent nozzles // Trans ASME, J. Basic Eng. 1964. V. 86. N. 4. P. 788–796.
2. Шишкин Н.Е. Аэродинамика и тепломассообмен в пристенных закрученных одно- и двухфазных струях: дисс. … докт. техн. наук: 01.04.14; утв. 9.02.17. М., 2017. 266 с.
3. С.С. Кутателадзе, А.И. Леонтьев, Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое (2-е изд. перераб. Энергоатомиздат, М., 1985).
4. Сухович Е.П. Экспериментальное исследование локальных характеристик закрученного турбулентного течения в цилиндрическом канале // Изв. СО АН СССР. 1978. № 8. Сер. техн. наук, Вып. 2. С. 91 – 100.

УДК 532.517

ИЗУЧЕНИЕ АКТИВНЫХ И ПАССИВНЫХ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКОМ И ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСОМ В СТРУЯХ

Демиденко Н.В., Яковенко С.Н.

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

Выполнены исследования истечения свободной и импактной струй из отверстия диаметром D со скоростью U при числе Рейнольдса Re (= UD/ν) < 10^5 с гармоническим колебанием скорости в сечении на входе, различной амплитуды A, частоты f, с числом Струхаля St (= $f\,D/U$) ≤ 0,5. Размеры ($30D\times10D\times24D$) и число узлов базовой расчетной области выбраны с учетом данных предшествующих работ [1-3]. Решения уравнений Навье–Стокса получены с помощью OpenFOAM с постоянной скоростью $u(r < D/2) = U$ на входе $x = 0$. Подробности постановки расчета приведены в [1].

Проверены следующие активные способы управления потоком: осевые (с частотой $f_a = 2f$), винтовые ($f_h = f$), раскачивающие ($f_f = f$) колебания входного профиля скорости с амплитудами $A = A_a = A_h = A_f$ [1-3], поперечная вибрация входного сечения частоты $f_v = f$, амплитуды Z [1] и их комбинации (рис. 1). Алгоритм верифицирован в расчетах на последовательных сетках, сделана валидация на данных эксперимента [4].

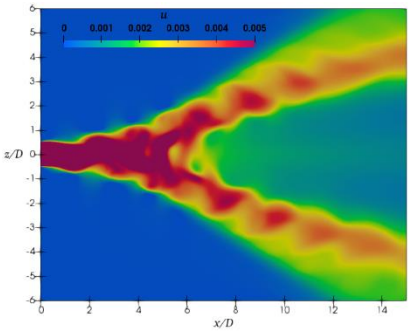


Рис. 1. Мгновенная скорость u(x,z) в плоскости бифуркации струи (y = 0) с комбинацией вибраций сопла и продольного возмущения при Re = 500, St = 0,2 и Z/D = A/U = 0,04.

Как и в измерениях [4], выявлено расщепление струи для широких диапазонов St, Re и амплитуд возбуждения ($A/U \le 0{,}2$, $Z/D \le 1{,}0$). Эффекты вибрации сопла и поперечного акустического поля аналогичны, однако первое является более эффективным методом управления, чем акустическое воздействие или винтовое и раскачивающие возмущения скорости на входе.

Характерная толщина d струи, угол расширения α в плоскости бифуркации, найденный по кривой $d(x)$, средние скорости $\langle u\rangle$ или скаляр $\langle c\rangle$ на оси могут параметризовать интенсификацию перемешивания, вызываемую возбуждением струи [1-4]. Эффективность смешения возрастает с увеличением d и α, что соответствует росту области расширения и меньшим $\langle u\rangle$ и $\langle c\rangle$ на осевой линии. Из данных расчетов для $Z \le D$, Re = 500, St = 0,15 видно: при $Z \sim 0{,}001D$ струя начинает расщепляться, начиная с сечения $x/D \approx 22$. При $0{,}001 < Z/D \le 0{,}1$ точка бифуркации смещается ближе к входу, α и d растут с увеличением Z; скорость на оси демонстрирует противоположные тенденции. Эффект возмущения при $Z > 0{,}1D$ выходит на насыщение.

В качестве пассивного метода управления потоком на входе встроены решетки различной формы (рис. 2), что способствует [5-6] интенсификации смешения и тепломассопереноса в свободной и импактной струях по сравнению с невозмущенной струей (рис. 3).

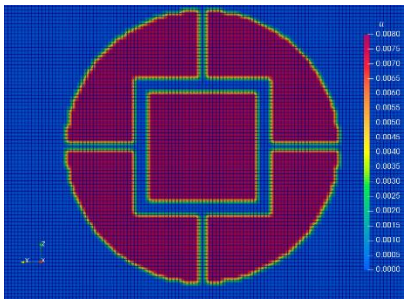


Рис. 2. Схема течения в окрестности сопла на входной границе: показаны изолинии продольной скорости, квадратные ячейки равномерной сетки и элементы решетки на входе для конфигурации SG2 [6], где скорость обращается в ноль.

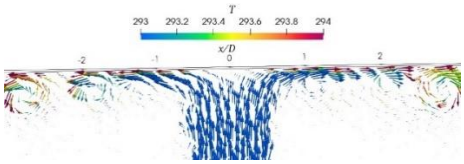


Рис. 3. Структура импактной струи при Re = 23 200 и теплоперенос в сечении y = 0 для t = 11D/U: поля температуры (цветом), вектор скорости (стрелками) у нагретой стенки.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00310, https://rscf.ru/project/23-27-00310/.

Список литературы:

1. Шевченко А.К., Яковенко С.Н. Численное исследование методов управления потоком и эффектов расщепления в круглой затопленной струе // Теплофиз. аэромех. 2021. Т. 28. С. 379-395.
2. Tyliszczak A., Geurts B.J. Parametric analysis of excited round jets – Numerical study // Flow, Turbul. Combust. 2014. Vol. 93. P. 221-247.
3. Gohil T.B., Saha A.K., Muralidhar K. Simulation of the blooming phenomenon in forced circular jets // J. Fluid Mech. 2015. Vol. 783. P. 567-604.
4. Reynolds W., Parekh D., Juvet P., Lee M. Bifurcating and blooming jets // Annu. Rev. Fluid Mech. 2003. Vol. 35. P. 295-315.
5. Cafiero G., Discetti S., Astarita T. Heat transfer enhancement of impinging jets with fractal-generated turbulence // Int. J. Heat Mass Transfer. 2014. Vol. 75. P. 173-183.
6. Cafiero G., Castrillo G., Greco C.S., Astarita T. Effect of the grid geometry on the convective heat transfer of impinging jets // Int. J. Heat Mass Transfer. 2017. Vol. 104. P. 39-50.

Секция 5 Процессы переноса при физико-химических превращениях, включая горение

УДК 621.181

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИИ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ТОПОЧНОЙ КАМЕРЕ КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА

Абрамов Н.В, Мальцев К.И., Гиль А.В.

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

Актуальность исследования обусловлена необходимостью анализа топочных процессов в котельных агрегатах с вертикальным вихрем при организации сжигания пылеугольного топлива с повышением экологических параметров посредством установки сопел третичного дутья. Несмотря на безуглеродную политику в современной энергетике, уголь остается одним из основных источников энергии [1], поэтому реконструкция котельных агрегатов с целью снижения вредных выбросов является весьма актуальной. Целью данного исследования является изучение аэродинамики и процессов горения пылеугольного топлива в объеме топочной камеры котельного агрегата с тангенциальной компоновкой горелочных устройств при организации схемы сжигания с третичным дутьем. Для численного исследования характеристик потока, процессов теплопередачи и горения в топке применен Эйлерово-Лагранжев подход [2].

В результате численного моделирования были получены зависимости концентраций продуктов сгорания, температуры, гидродинамики при сжигании кузнецкого угля марки Д в топочной камере с тангенциальной компоновкой горелок, спроектированной под бурые угли, а также при установке сопел третичного дутья. Выявлено недостаточное перераспределение воздуха между горелками и соплами третичного дутья, поскольку для поддержания стабильной закрутки вертикального вихря и, соответственно, наличия высоких значений скоростей на выходе из горелочных устройств не представляется возможным увеличение доли третичного воздуха без реконструкции горелок.

На рисунке 1 представлены результаты численного моделирования при номинальной нагрузке.

При установке сопел третичного дутья количество вторичного воздуха, подаваемого в основные горелочные устройства, снижается, что приводит к уменьшению интенсивности вращения воздушного потока и увеличению размера касательной окружности. Однако воздушные потоки от сопел третичного дутья не проникают вглубь вихря, поскольку он обладает существенной кинетической энергией [3]. Температурные поля внутри топочной камеры различаются незначительно во всех представленных вариантах. В зоне активного горения угольные частицы воспламеняются с выделением большого количества теплоты, и температура в топочной камере возрастает до максимальной. После этого за счет теплообмена между высокотемпературными продуктами сгорания и экранами топочной камеры температура постепенно снижается. При рассмотрении горизонтальных сечений на уровне расположения сопел третичного дутья можно выделить различие в конфигурации полей температур с наличием сопел третичного дутья и без них. Профиль высокотемпературного поля приближен к окружности и способствует более равномерному распределению температур по ширине и глубине топки.

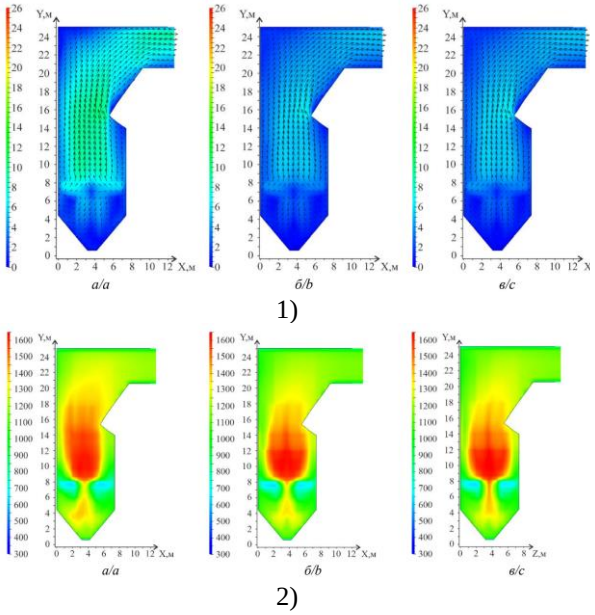


Рис. 1 Результаты численного моделирования: 1) аэродинамическая структура; 2) распределение температурных полей (а/а-без сопел третичного дутья; б/b-с четырьмя соплами; в/с-с шестью соплами)

Исследование показало, что численное моделирование является эффективным инструментом для анализа топочных процессов в котельных агрегатах. Рекомендуется при организации схем сжигания с третичным дутьем и при переводе на непроектный уголь реконструировать горелочные устройства с целью обеспечения рационального соотношения между аэропылью, вторичным и третичным воздухом.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-29-00274, https://rscf.ru/project/23-29-00274/)

Список литературы:

1. Scenarios for the deployment of carbon capture and storage in the power sector in a portfolio of mitigation options / J. Morris,H. Kheshgi, S. Paltsev, H. Herzog // Climate Change Economics. – 2021 – Vol. 12. – 2150001.
2. Исследование аэродинамики и горения в топке котла БКЗ-420-140 применительно к вариантам замещения проектного топлива / А.В. Гиль, А.С. Заворин, С.В. Красильников, С.В. Обухов, А.В. Старченко // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 310. – № 1. – С. 175–181.
3. Фурсов И.Д. Конструирование и тепловой расчет паровых котлов. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2016. – 297 с.

УДК 532.529+541.126

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИ СОГЛАСОВАННАЯ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГИБРИДНОЙ ДЕТОНАЦИИ ВОДОРОД-КИСЛОРОДНЫХ ВЗВЕСЕЙ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ В РАМКАХ ПРИВЕДЕННОЙ КИНЕТИКИ

Афанасенков А.А., Хмель Т.А.

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

Режимы детонационного горения газовзвесей частиц металлической или органической пыли представляют интерес как в плане взрывобезопасности, так и в перспективе использования в технических устройствах. Детонация в гибридных смесях реагирующих и инертных газов и реагирующих частиц характеризуется наличием гомогенных и гетерогенных реакций, а также фазовых переходов (плавления, испарения, конденсации). Моделирование детонации проводится обычно в рамках уравнений Эйлера с различными подходами для описания процессов химических взаимодействий: детальной кинетики, редуцированной или приведенной кинетики. Модели детальной кинетики, хорошо зарекомендовавшие себя в процессах турбулентного горения при дозвуковых течениях, имеют ряд недостатков при их применении в расчетах детонации. В частности, эти модели не обеспечивают адекватный размер детонационной ячейки. Экономичные верифицированные по ряду параметров модели приведенной кинетики широко используются в научных и инженерных расчетах. Термодинамически согласованная модель для описания детонации метановоздушной смеси приведена, например, в [1].

В настоящей работе представлена физико-математическая модель горения частиц алюминия в условиях гибридной детонации в смеси с водородом, кислородом и инертным газом. Описание химических взаимодействий водорода, кислорода и алюминия проводится в рамках приведенной кинетики. Для описания обобщенной реакции горения водорода с образованием паров воды используется модель Бедарева [2], верифицированная по задержкам воспламенения и ряду параметров детонации. Модель расширена применительно к бедным по водороду смесям, получено согласование с известными данными по скорости детонации и размерам детонационной ячейки. Горение алюминия описывается двумя обобщенными реакциями взаимодействия с кислородом и парами воды. Для реакции алюминия с кислородом в основе верифицированная модель гетерогенной детонации [3], которая была опробована для расчетов гибридной детонации в водород-кислородных смесях с аргоном и частицами алюминия малых концентраций [4]. Модель модифицирована с учетом перехода от гетерогенных реакций к гомогенным при температуре кипения алюминия (зависящей от давления окружающего газа). Предусмотрено образование как конденсированного оксида алюминия, так и газообразных субокислов. Также учитываются фазовые переходы в зоне реакции (испарение и декомпозиция оксида алюминия в субокислы). Взаимодействие алюминия с парами воды описывается одной брутто-реакцией, константы которой определены по известным данным [5]. Для определения состава преобладающих продуктов реакции и теплофизических параметров смеси привлекаются данные термодинамических расчетов [6].

Численный алгоритм решения уравнений Эйлера двухфазной смеси основан на применении явных конечно-разностных схем Хартена-Лакса и Джентри-Мартина-Дэйли с технологией распараллеливания на основе Open MP. Проведенные в рамках модели расчеты согласуются с данными экспериментов [7] по зависимости скорости детонации от загрузки взвеси частиц алюминия в бедной водородно-воздушной смеси при коэффициенте избытка топлива $\varphi=0.87$, а также по размерам детонационных ячеек. Модель может быть применима к расчетам гибридной детонации в неоднородных газовзвесях, как по концентрациям газовых компонент, так и по распределениям частиц в пространстве.

Приводятся примеры расчетов формирования и распространения плоских волн и ячеистой детонации в каналах. Проведены параметрические расчеты с варьированием загрузки и распределения частиц в пространстве. Показано, что введением в газовую смесь частиц алюминия различных концентраций и распределений можно управлять характеристиками ячеистой детонации: менять скорость детонации, характер и размер ячеек, конфигурацию фронтов.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта №. 24-29-00336

Список литературы:

1. P.A. Fomin, A.V. Trotsyuk, A.A. Vasil'ev. Approximate Model of Chemical Reaction Kinetics for Detonation Processes in Mixture of CH4 with Air//Combustion Science and Technology. 2014. V. 186. Issue 10-11.
2. Bedarev I.A., Rylova K. V., Fedorov A. V. Application of detailed and reduced kinetic schemes for the description of detonation of diluted hydrogen–air mixtures // Combust. Explos. Shock Waves. 2015. Vol. 51. № 5. P. 528–539.
3. Khmel T.A., Lavruk S.A. Detonation flows in aluminium particle gas suspensions, inhomogeneous in concentrations // J. Loss Prev. Process Ind. 2021. Vol. 72. P. 104522.
4. Т.А. Хмель, С.А. Лаврук. Моделирование течений ячеистой детонации в смеси водород-кислород-аргон с частицами алюминия// ФГВ. 2024. Т. 60. № 3. С. 104-116.
5. Bazyn T., Krier H., Glumac N. Combustion of nanoaluminum at elevated pressure and temperature behind reflected shock waves // Combust. Flame. 2006. V. 145, N 4. P. 703–713.
6. https://cearun.grc.nasa.gov
7. Veyssiere B., Ingignoli W. Existence of the detonation cellular structure in two-phase hybrid mixtures // Shock Waves. 2003. V. 12. № 4. P. 291–299.

УДК 534.222.2+536.46+661.215.1

СКОРОСТИ ДИФРАГИРУЮЩИХ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В ДВУМЕРНОМ КАНАЛЕ

Борискин А.А.[1], Васильев А.А.[1]

[1] Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15

В отличие от ударных волн, детонация предполагает наличие химической реакции горения на некотором малом расстоянии от фронта ведущей ударной волны. Так как фронт пламени, распространяясь за счёт термодиффузии и теплового излучения, имеет искривлённую поверхность, то он может деформировать фронт головной ударной волны. В результате вдоль поверхности ударного фронта распространяются поперечные волны. Таким образом, детонационная волна (ДВ) представляет собой искривлённую поверхность с пульсационным характером движения. Поэтому, простой перенос методики расчёта с ударных волн на детонационные не принесёт правильных результатов. Необходимо исследовать детонационные волны отдельно, а в качестве методики исследования наиболее пригодной в лабораторных условиях является дифракционная методика.

Целью данной работы является изучение скоростей фронта пламени за дифрагирующими детонационными волнами в квазиплоском канале. Исследование проводилось в плоском канале Р-типа (представляет собой два совмещённых канала различной ширины, имеющие одну общую верхнюю границу) толщиной 1,5 мм. В качестве рабочего газа, которым наполняли экспериментальную камеру и по которому распространялись детонационные волны, была выбрана стехиометрическая смесь ацетилена с кислородом. Сами процессы дифракции регистрировались методом покадровой высокоскоростной регистрации фронта свечения с помощью электронно-оптической камеры «НАНОГЕЙТ-22/16». Измерения скорости было проведено для двух характерных дифракционных процессов: срыв детонационной волны при дифракции с последующим турбулентным догоранием смеси (см. рис. 1) и реинициирование детонации с последующим детонационным сжиганием смеси (см. рис. 2).

Скорости фронта срывающейся детонационной волны измерялись вдоль пунктирных линий, показанных на последней фотографии первого рисунка. Эти пунктирные линии соответствуют верхней и нижней границе узкой части канала, а так же середине не распавшегося детонационного фронта, зафиксированного на последней фотографии (его нижняя граница отмечена сплошной линией на этой же фотографии).

На последней фотографии второго рисунка так же показаны пунктиром линии, вдоль которых проводились измерения скоростей. Показанные здесь линии соответствуют двум границам узкой части канала и его середине.

По результатам исследования установлен и изучен пульсационный характер движения волн, дифрагирующих из узкой части канала в широкую часть. Полученные результаты позволяют судить о том, как меняется скорость свечения фронта за дифрагирующей детонационной волной в зависимости от наличия или отсутствия эффектов трения на границах канала и распада детонационного фронта.

В идеализированной модели ДВ с плоским фронтом скорость ДВ (например на рисунке 1) равна 2254 м/с, экспериментальное значение усредненной ДВ 2042 м/с (средняя пунктирная линия), что обусловлено потерями энергии в двумерном канале.

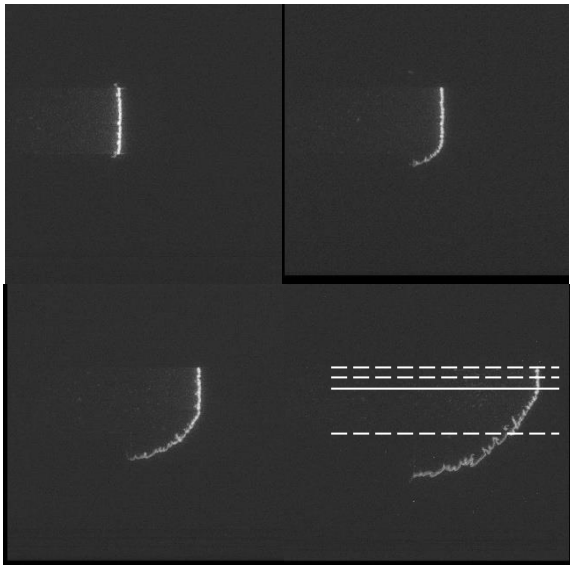


Рисунок 1. Пример срыва детонационной волны при дифракции.

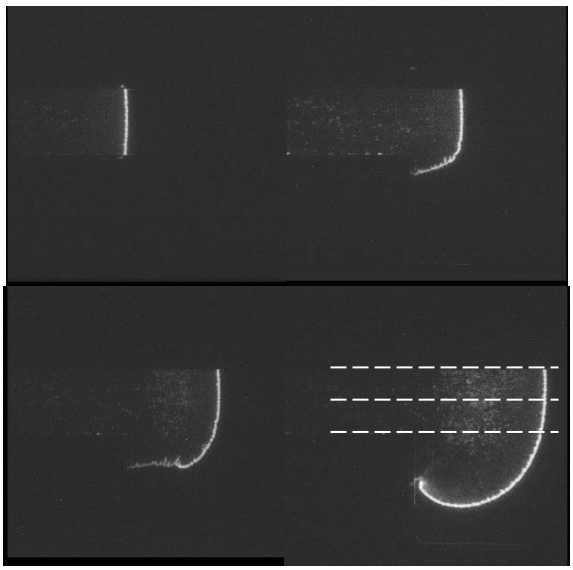


Рисунок 2. Пример восстановления детонационной волны при дифракции.

Данные исследования выполнены за счет финансов бюджета ИГиЛ СО РАН (номер госрегистрации № 121121600293-2) в рамках государственного задания.

УДК 536.6

ПРИМЕНЕНИЕ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ САЖЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ ПИРОЛИЗЕ ЭЛЕМЕНТА ЛЕСНОГО ГОРЮЧЕГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ОЦЕНКИ РИСКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛЕСНОГО ПОЖАРА НА НАСЕЛЕНИЕ

Барановский Н.В.[1], Вяткина В.А.[2]

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

Горение лесного горючего материала является основной причиной выбросов мелких частиц в атмосферу [1]. На размер и распределение частиц в пространстве влияет тип горючего материала, среда и условия горения, а также технология измерений. Быстрое увеличение размера частиц происходит сразу после выброса частиц дыма. Преобладающую долю твердых частиц, выбрасываемых в атмосферу, составляют углеродистые материалы, состоящие из органического и элементарного углерода. Такие частицы могут перемещаться на большие расстояние за счёт атмосферного переноса, попадая в воздух [2], которым дышат люди. Цель исследования – разработка математической модели для оценки вреда здоровью населения при термическом разложении сухого органического вещества лесного горючего материала, сопровождаемого образованием сажевых частиц.

В рамках исследования рассматривалась задача тепломассопереноса в листе берёзы при воздействии высокотемпературной среды. При моделировании элемент лесного горючего материала рассматривался в виде многослойной пластины. Физико-химические процессы математически описываются системой нестационарных дифференциальных уравнений теплопроводности и химической кинетики с соответствующими начальными и граничными условиями. При решении уравнений использовался метод конечных разностей [3]. Модель рассматривает процессы инертного прогрева образца, испарения влаги и пиролиза сухого органического вещества с образованием сажевых частиц.

В рамках численного моделирования применялся подход сценарного моделирования для прогнозирования опасности лесных пожаров, позволяющий оценить влияние основных факторов лесного пожара на поля температур и фаз лесного горючего материала. Для сценарного моделирования использовались средние температуры окружающей среды для каждого из периодов на территории Республики Бурятия (Российская Федерация). По результатам исследования были получены одномерные распределения температур и фаз в образце, позволяющие проводить количественный и качественный анализ изменений в структуре листа.

Для оценки влияния на население выбросов сажевых частиц была введена критическая величина объемной доли сажевых частиц (φ_*=0,03). Тогда условием вредного воздействия выброса сажевых частиц от лесных пожаров на население будет вероятность P_{soot}. Данную вероятность можно определить по формуле:

$$P_{soot} = \begin{cases} \exp\left(-(\Delta\varphi)^2\right), \Delta\varphi = \dfrac{\varphi - \varphi_*}{\varphi_*}, \varphi \le \varphi_* \\ 1, \varphi > \varphi_* \end{cases},$$

где φ – текущее значение объемной доли сажевых частиц, φ_* - критическое значение объемной доли сажевых частиц. Формула разработана на основе предположения о величине максимального вреда здоровью населения при превышении критического значения объемной доли сажевых частиц. В результате были получены типичные зависимости вероятности вреда здоровью для условий воздействия низового лесного пожара низкой интенсивности (см рис.1)

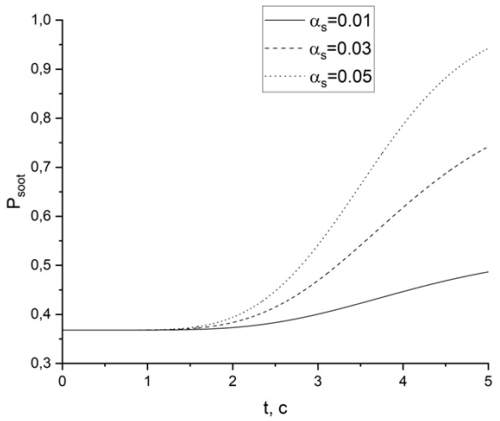


Рисунок 1 - Зависимость вероятности причинения вреда здоровью от времени при различных коэффициентах диспергирования

Основным преимуществом разработанной математической модели является возможности ее применения на практике для оценки, мониторинга и прогнозирования образования частиц сажи при лесных пожарах.

Список литературы:

1. Chen J., Li C., Ristovski Z., Milic A., Gu Y., Islam M.S., Wang S., Hao J., Zhang H., He C., Guo H., Fu H., Miljevic B., Morawska L., Thai P., LAM Y.F., Pereira G., Ding A., Huang X., Dumka U.C. A review of forest fuel burning: Emissions and impacts on air quality, health and climate in China // Science of The Total Environment. – 2017. – Vol. 579, p. 1000–1034.
2. Yoshizue M., Taketani F., Adachi K., Iwamoto Y., Tohjima Y., Mori T., Miura K. Detection of aerosol particles from siberian forest fuel burning over the western north pacific // Atmosphere. – 2020. – Vol. 11. – P.1175
3. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 172 с

УДК 621.311.22

ИЗМЕРЕНИЕ И СТОХАСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ В КОНИЧЕСКО-ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ ГАЗИФИКАЦИИ ОПИЛА

Ершов М.И.[1], Никитин А.Д.[1], Масленников Г.Е.[1], Тупоногов В.Г.[1], Рыжков А.Ф.[1]

[1] Уральский федеральный университет,
ул. Мира 19, Екатеринбург, 620002, Россия

Поточные газификаторы на углеродно-нейтральной биомассе (опиле) представляют интерес с точки зрения экологичного и удобного способа производства синтез-газа в составе объектов распределенной энергетики. Однако создание устойчивых гидравлических режимов в реакторе затруднено из-за разнообразной формы и состава частиц опила. Стохастический анализ пульсаций давления во временной области является самым простым и наиболее часто используемым для контроля гидродинамического режима работы газификатора.

Работа направлена на установление связи амплитудно-частотных и корреляционно-когерентных характеристик пульсаций давления с количественными и качественными показателями работы реактора для газификации опила.

Для достижения поставленной цели были произведены измерения давления в лабораторной установке газификации опила в поточном режиме с расчётной производительностью по топливу 8–20 кг/ч.

Реакционное пространство газификатора имеет высоту 1,5 м, а диаметр широкой части составляет 0,3 м. Предусмотрено три варианта подачи воздуха и варианта подачи топлива, что позволяет исследовать различные варианты подачи топлива и воздуха в реактор. В данной работе исследован вариант, включающий подачу первичного воздуха снизу (по оси реактора), подачу вторичного воздуха в нижний цилиндрический участок через четыре сопла, расположенных перпендикулярно вертикальной оси реактора в аварийном и безаварийном режиме работы, а также вариант, когда вторичный воздух подается через четыре сопла сверху-вниз.

Воздух подается с помощью воздуходувки. Расход воздуха регулируется вентилем и измеряется ротаметром. Воздух подогревается электрическим нагревателем из нихромовой спирали до температуры 400°C. Топливо (сосновые опилки) подается шнеком с регулируемой частотой вращения из бункера. Средний размер опила составил 90–2000 мкм. Горячий синтез-газ на выходе из реактора поступает в камеру дожигания, где смешивается с воздухом, присасываемым за счет работы дымососа. После камеры дожигания осуществляется присос воздуха для снижения температуры продуктов сгорания до температуры 150-170°C. Охлажденные дымовые газы направляются дымососом в дымовую трубу. Средняя температура в коническо-цилиндрической проточной части аппарата, находилась в диапазоне 800-1000°C.

При измерении перепада давления использовались два датчика Keller PD-33X (максимальная частота измерений одного датчика в цифровом режиме 64 Гц). Стохастический анализ пульсаций давления был выполнен с применением программного пакета MATLAB R2022b.

Измерения давления проводились на различных высотах в коническо-цилиндрической части газификатора. Измерялись абсолютные давления и давления относительно наивысшего сечения установки (вход в камеру дожигания). Длительность записываемых реализаций достигала 3 часов. По полученным пульсациям давления строились оконные преобразования Фурье, средние скользящие давления и среднеквадратические отклонения, когерентность, спектрограммы, взаимная корреляция и вейвлет-разложение сигналов.

Для двух вариантов подачи вторичного воздуха построено распределение перепада давления по высоте относительно атмосферы и наивысшего сечения установки и исследованы стохастические характеристики сигналов давления. Обнаружено, что в поточном режиме доминантные частоты одинаковы на всех высотах и зависят от расхода топлива, и функция когерентности дает максимум на данных частотах. Так, при расходе топлива 4,95 кг/ч (растопка) доминантная частота равна 0,18 Гц, при 12,1 кг/ч – 0,43 Гц, а при 18,4 кг/ч – 0,68 Гц. Среднеквадратическое отклонение при этом следовало за изменением расходов первичного и вторичного воздуха. В случае накопления и отрыва шлака (аварийный режим) система переходила в режим нестабильного фонтанирования с нестационарной доминантной частотой в диапазоне 0,5-8 Гц и значительным приростом среднего давления и среднеквадратического отклонения внизу конуса. Исследование взаимной корреляции между двумя различными точками показало, что в большинстве случаев сдвиг данной функции нестабилен во времени, а максимальная корреляция меньше 0,35 по модулю.

Из литературного анализа видно, что полученные доминантные частоты в исследуемой установке соответствуют наблюдениям других исследователей поточных газодисперсных систем [1]. В данный момент проводятся исследования с целью разработки методов контроля, диагностики и управления гидродинамическим режимом в реакторах для газификации опила.

Список литературы:

1. Jiradilok V., Gidaspow D., Breault R. W., Shadle L. J., Guenther C., Shi S. Computation of turbulence and dispersion of cork in the NETL riser // Chemical Engineering Science. 2008. V. 63. № 8. P. 2135-2148.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы развития Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина в соответствии с программой стратегического академического лидерства "Приоритет-2030".

УДК 533.6.011

О ВОЗМОЖНЫХ МЕХАНИЗМАХ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГОРЕНИЕ В ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ПОТОКЕ В КАНАЛЕ

Замураев В.П., Калинина А.П.

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

Для инициирования горения в высокоростном потоке требуется либо высокоэнергетическое воздействие, либо искусственное создание рециркуляционных зон, в которых из-за увеличения времени контакта между реагентами повышается вероятность химической реакции. Однако существует еще один фактор, играющий роль в высокосоростном потоке: в вихревых зонах происходит диссипация кинетической энергии в тепло, достигается порог энергии активации, и химическая реакция идет интенсивно. Экспериментальное исследование при высоких скоростях обычно ограничивается измерением давления и визуальным наблюдением. При этом увеличение давления трактуется как наличие горения, а свечение – результат воспламенения. Как будет показано, при большом различии молекулярных масс в газообразном топливе и в основном потоке, повышение давления может быть вызвано причинами, не связанными с горением, и на воспламенение оказывает влияние скорость диссипации энергии в вихревых зонах. Моделируемая система аналогична моделям, используемым в [1, 2]. В отличие от [1,2], здесь проведены расчеты и для осесимметричной, и плоской систем. Используется система нестационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье — Стокса с k–ε-моделью турбулентности и уравнениями упрощенной химической кинетики с брутто-реакциями для углеводородного топлива и водорода. Для производства турбулентной кинетической энергии применяется ограничитель со значением константы Production Limiter Clip Factor = 1. Подробнее постановка задачи описана в [2]. Канал состоит из двух секций постоянного сечения с поперечным размером выходной секции в 2 раза больше, чем для входной. На входе в первую секцию находится сопло Лаваля, формирующее высокоскоростной поток. Горение в первой секции инициируется газодинамическими импульсами, создающими ударную волну. Во второй секции горение практически не происходит, но половина ее поперечного сечения заполнена высокотемпературными продуктами сгорания (из-за горения в первой секции). Непосредственно перед внезапным расширением канала, соответствующим входу во вторую секцию, подавался водород, чья молекулярная масса много меньше, чем для воздуха и продуктов сгорания в основном потоке. В [1] отмечалось, что подача водорода приводит к стабилизации горения в первой секции, а давление при этом повышается примерно в два раза. В результате проведенного численного исследования показано, что повышение давления может происходить и без воспламенения водорода, при подаче которого из-за его низкой молекулярной массы формируется дозвуковое течение в пристеночной области, что ведет также к равномерному повышению давления и разрушению ударно-волновой структуры в центральной части канала. Так как водород во второй секции не горел, для его воспламенения была использована струя сжатого воздуха. Показано, что при низкой температуре струи происходит формирование вихревых зон с последующим сгоранием водорода, а при высокой температуре этого не происходит. При низкой температуре струи и одном и том же давлении больше расход воздуха и более сильное воздействие на течение в канале. Обычно считается, что в вихревых зонах время пребывания смеси большое и происходит эффективное перемешивание. Однако проведенное нами исследование показало, что важным механизмом является повышение скорости диссипации турбулентной энергии. Для плоского канала с истечением водорода непосредственно перед уступом было выполнено численное моделирование при разных значениях Production Limiter Clip Factor. Совпадение с экспериментальными данными достигалось при его значении, равным 1, которое и использовалось в расчетах. Сжатый воздух ниже по потоку не подавался. Оказалось, что качественно вид процесса резко изменяется при изменении этого коэффициента с 1 на 2: если при значении 1 водород не горит, то при значении 2 он уже успешно сгорает, что может быть объяснено только нагревом потока вследствие диссипативных процессов. Таким образом, показано, что повышение давления не обязательно является индикатором горения, причиной может быть большое различие молекулярных масс воздуха и подаваемого сбоку водорода. Кроме того, интенсификации горения способствует также диссипация кинетической энергии крупных вихрей в тепло.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТПМ СО РАН.

Список литературы:

1. Третьяков П. К. Организация эффективного горения керосина в канале при больших скоростях потока // Физика горения и взрыва. 2020. Т. 56, № 1. С. 42-47.

2. Замураев В.П., Калинина А.П. Формирование околозвуковой области в канале переменного сечения при различных температурах торможения потока

УДК 532.525.2

ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ СМЕСИ МИКРОСТРУИ ВОДОРОДА С РАЗЛИЧНЫМИ ГАЗАМИ

Козлов В.В., Литвиненко Ю.А., Шмаков А.Г., Павленко А.М.

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

В работах [1-5] представлены результаты экспериментальных исследований режимов горения и структуры диффузионного пламени водорода, образующегося при истечении с высокой скоростью водорода в воздух через круглые отверстия различных диаметров. Найден диапазон скоростей истечения водородной струи и диаметров сопловых отверстий, при котором пламя разделяется на две зоны - ламинарную и турбулентную. Зона с ламинарным течением является стабилизатором горения всего пламени в целом, а в зоне с турбулентным течением происходит интенсивное смешение основной части горючего с окислителем с последующим горением. Горение в этих двух зонах может происходить независимо друг от друга, но наиболее устойчивый режим наблюдается только при существовании пламени в зоне с ламинарным течением.

Исследованная система может представлять интерес с точки зрения организации эффективного перемешивания различных потоков и их подогрева. В таком режиме сгорает только небольшая часть водорода, а остальная смешивается с продуктами горения и воздухом, в результате чего температура такой смеси может варьироваться (путем подбора скорости потока и диаметра сопла) от близкой к начальной до температуры самовоспламенения водорода. Кроме того, такая система может служить своеобразным "реактором" для осуществления, например, в мягких и контролируемых условиях различных термолитических реакций. К ним можно отнести такие реакции, как синтез наночастиц металлов и оксидов металлов из летучих металлсодержащих прекурсоров или обработка углеводородного сырья и т.д.

В связи с этим важно изучить влияние газообразных добавок в поток водорода с различными химическими (инертные и реагирующие) и физическими (с разным молекулярными весами, теплопроводностью и диффузией) на режимы горения микроструй смесей водорода с другими газами при их истечении из круглых сопел в воздух.

Цель проведения работы заключается в исследовании особенностей диффузионного горения круглой микроструи смеси водорода с метаном, гелием и азотом.

Для изучения процесса горения смеси газов в круглой микроструе использовался Шлирен-метод. Процесс горения фиксировался как в виде непосредственного изображения пламени, так и в виде его теневой картины с использованием методики Тёплера. Расход каждого из газов устанавливался с помощью регуляторов массового расхода газов (MKS Instruments, Inc., USA) с точностью ±0,1 см^3/с.

Из проведенных исследований диффузионного горения смесей водорода с метаном, гелием или азотом в круглой микроструе можно сделать следующие выводы:

Механизм и характеристики развития микроструи и пламени при горении смесей водорода с одним из указанных газов связаны с образованием области перетяжки пламени, подобной той, что наблюдается при горении чистого водорода.

Область перетяжки пламени имеет сферическую форму, где происходит смешение струи смеси с окружающим воздухом и их последующее горение, а также турбулизация ламинарной микроструи и пламени при преодолении границ сферической области.

Процесс диффузионного горения смеси водород/метан сопровождается стадиями отрыва, срыва и прекращения горения в области перетяжки пламени, что соответствует процессу горения чистого водорода.

Стадии горения смеси водород/метан реализуются при меньших скоростях истечения микроструи, чем при горении чистого водорода.

Устойчивость горения смеси водород/метан повышается по сравнению с горением чистого метана, что позволяет расширить диапазон условий устойчивого турбулентного горения углеводородов.

Для стабилизации горения при увеличении скорости истечения микроструи необходимо увеличивать долю водорода в смеси газов.

Список литературы:

1. Козлов В.В., Грек Г.Р., Коробейничев О.П., Литвиненко Ю.А., Шмаков А.Г. Особенности горения водорода в круглой и плоской микроструе в поперечном акустическом поле и их сравнение с результатами горения пропана в тех же условиях // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2014. Т. 9, вып. 1. С. 79–86.
2. Шмаков А.Г., Грек Г.Р., Козлов В.В., Коробейничев О.П., Литвиненко Ю.А. Различные режимы диффузионного горения круглой струи водорода в воздухе // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2015. Т. 10, вып. 2. С. 27–41.
3. Козлов В.В., Грек Г.Р., Коробейничев О.П., Литвиненко Ю.А., Шмаков А.Г. Горение истекающей в воздух высокоскоростной микроструи водорода // Авиадвигатели XXI века: Тез. докл. Всерос. Науч.- Техн. Конф. М., 2015.
4. Грек Г.Р., Катасонов М.М., Козлов Г.В., Литвиненко М.В. Диффузионное горение водорода (круглое скошенное сопло) // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2015. Т. 10, вып. 2. С. 42–51.
5. Козлов В.В., Грек Г.Р., Коробейничев О.П., Литвиненко Ю.А., Шмаков А.Г., Горение истекающей в воздух высокоскоростной микроструи водорода // Доклады Академии Наук (ДАН), 2016, том 470, № 2 с. 166-171.

Работа выполнена при поддержке проекта Министерства образования и науки по соглашению №075-15-2024-543 от 24.04.2024.

УДК 544.3

КОРРЕКТИРОВКА ТЕМПЕРАТУРЫ ОБРАЗЦА В КАМЕРЕ ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ КИНЕТИКИ ОКИСЛЕНИЯ УГЛЕРОДА

Козлова М.А., Донской И.Г.

Институт энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 130

Термогравиметрия является одним из методов изучения теплофизических и реакционных свойств веществ, в т.ч. энергетических топлив. В приборе термического анализа образец подвергается заданному температурному воздействию, которое задается через нагрев стенок камеры и проточной газовой смеси. При этом регистрируется изменение его массы и других доступных для измерения характеристик (состав продуктов, тепловые эффекты).

При исследовании процессов окисления и разложения материалов, сопровождающихся интенсивным тепловыделением, тигель может подвергаться существенному перегреву в сравнении с окружающей газовой средой [1, 2]. Например, это проявляется при исследовании образцов топлив в окислительной атмосфере, когда температура в зоне горения отличается от заданной программы. При определенных условиях перегрев может привести к неконтролируемому развитию химической реакции [3]. В этом случае измеренные данные (рис. 1 и 2) нуждаются в корректировке.

В работе [4] была предложена методика корректировки температуры образца для эндотермических процессов (сушка и испарение воды), при этом было показано, что разность температур между поверхностью образца и газовой средой может достигать нескольких десятков градусов (за счет испарительного охлаждения). Для корректировки требуется калориметрический сигнал, регистрирующий термическую ЭДС между тиглем сравнения и тиглем, содержащим исследуемый образец. Обработка этого сигнала позволяет оценить величину отклонения температуры образца от заданной программы. Обратная задача усложняется, поскольку и реакционная способность образца, и его теплофизические свойства, как правило, неизвестны.

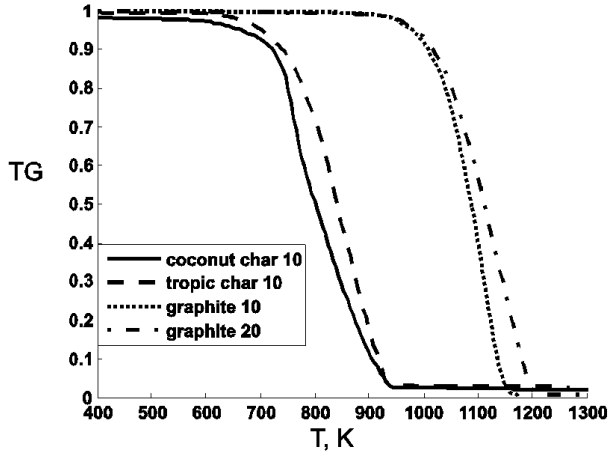


Рис. 1. Термогравиметрические кривые окисления разных сортов углерода

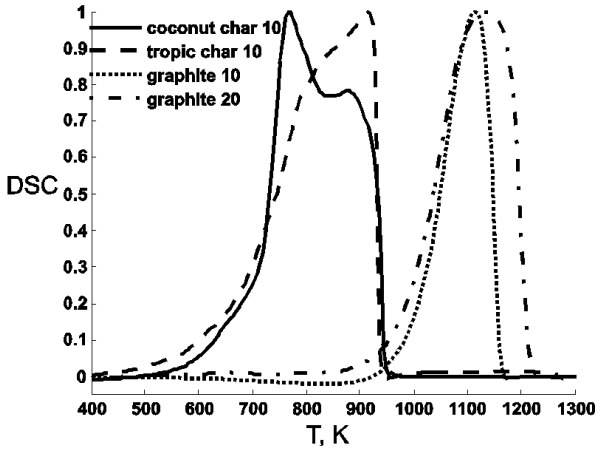


Рис. 2. Калориметические кривые окисления разных сортов углерода.

Для упрощения в работе рассматривается окисление углеродистых материалов, что позволяет исключить многостадийные реакции и сузить диапазон ожидаемых тепловых эффектов.

Список литературы:

1. Худякова Г.И. Экспериментальное исследование термохимической конверсии коксового остатка угля методом термогравиметрического анализа. Автореф. дисс. ... к.т.н. (01.04.14). Екатеринбург: УрФУ, 2015. 24 с.
2. Branca C., Di Blasi C. Self-heating effects in the thermogravimetric analysis of wood char oxidation // Fuel. 2020. V. 276. P. 118012.
3. Гонтковская В.Т., Барзыкин В.В. Численный анализ кинетических кривых в термографии // Известия СО АН СССР. Серия химических наук. 1974. Вып. 4. № 9. С. 68-72.
4. Kozlov A.N. et al. A DSC signal for studying kinetics of moisture evaporation from lignocellulosic fuels // Thermochim. Acta. 2021. Vol. 698. P. 178887.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00406 с использованием ресурсов ЦКП "Высокотемпературный контур".

УДК 662.74

ЗАЖИГАНИЕ ЧАСТИЦ УГЛЯ С КОНТРОЛИРУЕМОЙ ВЛАЖНОСТЬЮ В УСЛОВИЯХ, СООТВЕТСВУЮЩИХ КАМЕРАМ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

Косторева Ж.А., Омаров А.А., Сыродой С.В.

Томский политехнический университет
630050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30

Проблема энергетической безопасности стала основной проблемой мирового сообщества в последние годы вследствие неравномерного распределения энергоресурсов по территории Земли [1]. В последние десятилетия развитыми государствами всего мира проводилась «ошибочная» (как сейчас выясняется) политика по директивному широкомасштабному внедрению в общий баланс производства тепловой и электрической энергии возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Однако уже известно, что стабильность работы возобновляемых источников энергии существенно зависит от погодных условий и времени суток [2]. По этой причине уже сейчас правительствами многих государств поднимаются вопросы о принятии новых программ развития энергетического сектора экономики на основе масштабного строительства атомных и тепловых электрических станций [3].

Решить эту глобальную проблему можно при переходе на более масштабное использование угля как энергоносителя. Угольные ТЭС обеспечивают стабильное производство тепловой и электрической энергии, в отличие от ВИЭ. Но уголь является «грязным» топливом - при его сжигании образуются значительные объемы диоксида углерода [4], а также оксиды серы [5] и азота [6].

Целью настоящей работы является экспериментальное обоснование возможности использования умеренно увлажненного угля в качестве основного топлива на объектах энергетики с целью снижения вредного воздействия последних на окружающую среду. Реализация технологии снижения антропогенных выбросов с использованием водяного пара может быть реализован тремя способами. Первый – ввод в топку мелкодисперсного угля и распыленной воды через разные устройства для распыления. Угольная пыль вводится через обычные горелочные условия, а вода через дополнительные форсунки, установленные так, чтобы сразу после ввода частиц угля они увлажнялись в результате взаимодействия на начальном участке топки с каплями воды. Второй, более сложный, - ввод через одно горелочное устройство и частиц угля и капель воды аналогично вводу горючего и окислителя в жидкостных ракетных двигателях – вода вводится вблизи стенок горелки, а угольная пыль в ядре потока. Третий – сжигания умеренно влажных углей с программируемой влажностью в поточном устройстве.

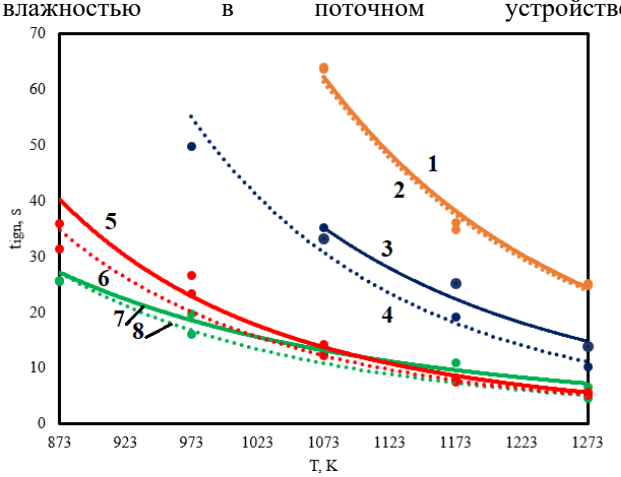


Рис. 1. Зависимости времен задержки зажигания частиц угля от температуры внешней среды: 1 – антрацит влажная частица; 2 – антрацит сухая частица; 3 – тощий влажная частица; 4 – тощий сухая частица; 5 - длиннопламенный влажная частица; 6 – длиннопламенный сухая частица; 7 – бурый влажная частица; 8 – бурый сухая частица.

Исследование выполнено за счет грантов РНФ (проект № 23-79-01067)

Список литературы:

1. Coal decarbonization: A state-of-the-art review of enhanced hydrogen production in underground coal gasification / Liangliang Jiang, Dan Xue, Zixiang Wei, Zhangxing Chen, Mammad Mirzayev, Yanpeng Chen, Shanshan Chen // Energy Reviews. – 2022. – V.1. – P. 100004.
2. Instability risk analysis of distributed renewable energy caused by energy storage balance zone / Jianwei Cao, Yanxin Li, Wenduo Sun, Lei Zhang, Yixuan Yang // Energy Reports. – 2022. – V.8. – P. 12958-12969.
3. A Petri net model-based resilience analysis of nuclear power plants under the threat of natural hazards / Rundong Yan, Sarah Dunnett, John Andrews // Reliability Engineering and System Safety. – 2023. – V. 230. – P.108979.
4. Techno-economic assessment of coal- or biomass-fired oxy-combustion power plants with supercritical carbon dioxide cycle / Xiaoyu Wei, Vasilije Manovic, Dawid P. Hanak // Energy Conversion and Managemen. – 2020. – V. 221. – P.113143.
5. Sulphur Oxide Emissions from Dust-fired Oxy-fuel Combustion of Coal / Reinhold Spörl, Jörg Maier, Günter Scheffknecht // Energy Procedia. – 2013. – V.37. – P.1435-1447.
6. Curtailing the generation of sulfur dioxide and nitrogen oxide emissions by blending and oxy-combustion of coals / Emad Rokni, Aidin Panahi, Xiaohan Ren, Yiannis A. Levendis // Fuel. – 2016. – V. 181. – P.772-784.

УДК 621.9

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕВЫХ PUFF СТРУКТУР С ЯЧЕИСТЫМ МЕТАНО-ВОЗДУШНЫМ ПЛАМЕНЕМ

Дубнищев Ю.Н., Золотухина О.С., Леманов В.В, Шаров К.А., Лукашов В.В.

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

Как известно [1] фронт пламени предварительно перемешанного метано-воздушного пламени при коэффициенте избытка топлива 0.7…0.9 в горелке Бунзена приобретает неоднородную полиэдральную структуру. Визуально наблюдаются продольно ориентированные ячейки пламени. Небольшое изменение состава смеси ~0.1% может привести к изменению количества ячеек или к появлению вращательного движения ячеек пламени относительно оси струи. При этом перемещения собственно вещества не происходит. Меняется положение особенности области химического реагирования. Обогащение топлива водородом качественно не меняет структуру пламени [2]. В настоящее время одним из методов управления горением является воздействие крупномасштабных вихревых структур на фронт пламени [3].

В работе проведено экспериментальное исследование взаимодействия крупномасштабных вихревых структур с фронтом ячеистого пламени метана с помощью оптического метода на основе гильберт визуализации. Скоростная видео съёмка в оптическом диапазоне производилась с частотой 1.5 кГц. Гильберт-диагностика является эффективным инструментом для анализа световых полей в оптических системах. Методы гильберт-оптики позволяют более точно восстанавливать фазовые функции и оценивать, при соответствующей обработке, температурные поля и молярные концентрации продуктов горения [4]. Факел предварительно перемешанной метано-воздушной смеси (CH_4 – чистота 99.99%) формировался при истечении топлива из кварцевой трубки диаметром d=13 мм и длиной l=1 м в воздух. Камера смешения горелочного устройства обеспечивала предварительное перемешивание и формирование однородного состава смеси и минимизацию пульсаций давления. Состав и расходные характеристики топливо-воздушной смеси обеспечивались цифровыми регуляторами. Опыты проводились при числах Рейнольдса Re=1960-3650, когда внутри трубки происходил ламинарно-турбулентный переход. Как известно этот процесс осуществляется через механизм перемежаемости ламинарного и турбулентного участка течения. В результате на выходе из трубки формировались крупномасштабные турбулентные структуры (*puff*), которые были устойчивыми на начальном участке факела [3]. Как известно этот процесс осуществляется через механизм перемежаемости ламинарного и турбулентного участка течения [5]. В результате на выходе из трубки формировались крупномасштабные (l/d=20-30) турбулентные структуры (*puff*), которые были устойчивыми на начальном участке факела [3]. Характерный вид пламени и примеры полученной визуализации puff структур в пламени Бунзена приведены на рис.1. Левый кадр получен с помощью фотоаппарата и визуализирует внешний вид пламени при отсутствии *puff*. Два правых кадра получены с помощью гильберт-визуализации пламени в разные моменты времени. Первый гильберт-кадр получен при отсутствии вихревой структуры, второй кадр зарегистрирован в момент движения *puff* в пламени.

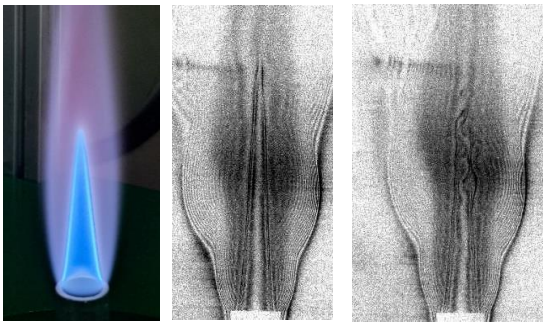


Рис. 1. Пламя предварительно перемешанной смеси CH_4 с воздухом, богатая смесь.

При прохождении *puff* (второй гильберт-кадр) наблюдается возмущение всего фронта пламени. Наибольшая деформация происходит в рамках внутреннего конуса, менее значительное влияние наблюдается для внешней границы пламени. Видно, что в момент прохождения вихревой структуры во внутреннем конусе, соответствующем фронту пламени гомогенной смеси CH4/воздуха, развивается синусоидальная неустойчивость. Исследованию особенностей взаимодействия продольных суперструктур с ячеистым пламенем и посвящена данная работа.

Список литературы:

1. Sohrab S.H., Law C.K. Influence of Burner Rim Aerodynamics on Polyhedral Flames and Flame Stabilization // Combustion and flame. 1985. v. 62.
2. Shi S., Breicher A., Trabold J., Hartl S., Barlow R.S., Dreizler A., Geyer D. Cellular structures of laminar lean premixed H2/CH4/air polyhedral flames // Applications in Energy and Combustion Science. 2022. v. 13. 10.1016/j.jaecs.2022.100105
3. Lemanov V., Lukashov V., Sharov K. Turbulent superstructures in inert jets and diffusion jet flames // Fluids. 2022. v. 6. Art. No. 459.
4. Arbuzov V.A., Arbuzov E.V., Dubnishchev Yu.N., Lukashov V.V., Zolotukhina O.S. Optical diagnostics of hydrogen-air diffusion jet flame / // Journal of Engineering Thermophysics. 2022. v. 31. 10.1134/S1810232822030031
5. Mullin T. Transition to turbulence in a pipe // Ann. Rev. Fluid Mech. 2011. V. 42. P. 1–24.

УДК 532.525.2

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ДИФФУЗИОННОГО ГОРЕНИЯ МИКРОСТРУЙ ВОДОРОДА

Тамбовцев А.С., Козлов В.В., Литвиненко Ю.А., Павленко А.М., Шмаков А.Г.

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

Ламинарно-турбулентный переход в дозвуковых струях изучен достаточно подробно как теоретически, так и с экспериментально [1-6]. Профиль распределения скорости на срезе классических сопел конфузорного типа при больших числах Рейнольдса (Re > 104) имеет П-образную форму. Ламинарно-турбулентный переход в этом случае происходит в пределах начального участка струи в слое смешения. В таком случае основная неустойчивость, приводящая к разрушению струи – неустойчивость Кельвина-Гельмгольца. Присоединение к классическому соплу удлиненного цилиндрического канала приводит к формированию параболического профиля скорости на срезе сопла, формированию ламинарного участка струи большей протяженности (при той же скорости истечения) и смещению переходного участка далее по потоку [5]. Открытыми остаются вопросы: о развитии диффузионного водородного факела при наличии области ламинарно-турбулентного перехода, поскольку данная область формирует две зоны горения; влияние области поджига (вблизи среза/ в турбулентной области) на гистерезис развития факела.

В данной работе получены результаты экспериментального исследования диффузионного горения круглой микроструи водорода, вытекающей из цилиндрического тонкостенного микросопла диаметром 200 мкм при воспламенении вблизи и на большом расстоянии от среза сопла (см. рис. 1). Из баллона (1) газ попадет в сопловое устройство (4) через клапан регулятора массового расхода газа (MKS Instruments) (2), обеспечивающие точность ± 0.7%. Управление объемным расходом газов осуществлялась блоком управления (3). Скорость истечения микроструи определялась по формуле U = Q/S, где S – площадь поперечного сечения насадка. Поджигание микроструи производилось как вблизи среза микросопла, так на расстоянии от него для реализации режима горения с факелом, приподнятым над срезом сопла.

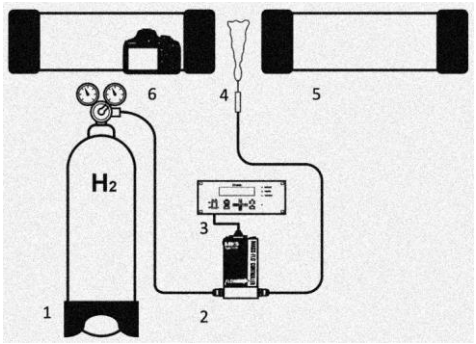


Рис.1. Экспериментальная установка: 1 – баллон со сжатым водородом 2 – клапан расходомера, 3 – контроллер расходомера, 4 – сопло, 5 – теневой прибор ИАБ – 451, 6 – фотоаппарат.

Теневые картины диффузионного горения получены при помощи прибора ИАБ-451(5), съемка производилась с помощью цифрового фотоаппарата (6) (см. рис. 1). Скорость истечения микроструи определялась по формуле U_0 = Q/S, где S – площадь поперечного сечения сопла.

В результате исследований получены сценарии диффузионного горения круглых микроструй водорода при поджигании вблизи и на расстоянии от среза сопла в зависимости от скорости истечения. Изучена литература по теме исследования и проведено сравнение по безразмерным параметрам на основе числа Рейнольдса. Установлено, что стабилизация факела при истечении круглой микроструи водорода связана с нагревом сопла ламинарной областью пламени. Обнаружен гистерезис процесса диффузионного горения круглых микроструй водорода в зависимости от области зажигания микроструи (ламинарная или турбулентная область факела) и изменения скорости струи.

Список литературы:

1. Турбулентное смешение газовых струй / Г.Н. Абрамович. М.: Наука, 1974. 272 с.
2. Ho C.M., Huerre P. Perturbed free shear layers // Ann. Rev. Fluid Mech. 1984. V. 16. P. 356–424.
3. Michalke A. Survey on jet instability theory // Prog.Aerosp.Sci. 1984. V.21. No3. P. 159–199.
4. Акустическое управление турбулентными струями / А.С. Гиневский, Е.В. Власов, Р.К. Каравосов. М.: Физматлит, 2001. 240 с.
5. Козлов Г. В., Грек Г. Р., Сорокин А. М., Литвиненко Ю. А. Влияние начальных условий на срезе сопла на структуру круглой струи // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15, No 1. С. 59–73.
6. Ball C.G., Fellouah H., Pollard A. The flow field in turbulent round free jets // Prog. Aerosp. Sci. 2012. V. 50. P. 1–26. https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2011.10.002

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-19-00151, https://rscf.ru/project/22-19-00151/.

УДК 532.517.2:536.24

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛО-МАССОПЕРЕНОСА ГАЗОПЫЛЕВЫХ РЕАГИРУЮЩИХ ПОТОКОВ

Пескова Е.Е.[1], Снытников В.Н.[2]

[1] Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва,
430005, Россия, Саранск, ул. Большевистская, 68
[2] Институт катализа имени Г. К. Борескова СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 5

В работе проведено численное моделирование внутреннего течения ламинарного двухфазного потока метана и каталитических наночастиц под воздействием лазерного излучения. Расчеты проведены на основе нестационарной системы уравнений вязкой газопылевой двухфазной среды с химическими реакциями и лазерным излучением [1], для которой ранее был построен вычислительный алгоритм на основе схемы расщепления по физическим процессам [2]. Для описания химических превращений использована гетерогенно-гомогенная схема радикально-цепных реакций конверсии метана [3].

Исследование проведено в прямой трубе круглого сечения диаметром 0.02 м и длиной 0.3 м в осесимметричной постановке задачи: с левого торца трубы вводится газ и каталитические наночастицы с расходом 60 л/ч, с правого торца задано условие вытекания потока. Излучение CO2 лазера вводится с левого торца вдоль оси трубы и поглощается этиленом и частицами. Стенки трубы обогреваются до температуры 1123 К. Таким образом мы задаем режим, при котором газопылевой поток полностью прогревается за счет энергии, подаваемой от стенок трубы.

Детально исследовано течение при мощности излучения в 30 Вт. Получено, что воздействие лазерного излучения, имеющего интенсивность на порядки выше теплового потока со стенок, увеличивает температуру в области поглощения излучения (до 1300 К) и способствует интенсификации гетерогенно-гомогенных реакций со значительным образованием радикалов. Рост конверсии метана в области поглощения составил от 1% до 33% с образованием этилена, водорода, ацетилена и бензола. В отсутствии излучения в этой же области трубы конверсия метана составляет 17%.

Проведены расчеты числа Нуссельта вдоль стенки трубы для различных расходов смеси и мощности излучения. Было получено образование трех различных тепловых режимов: начальная область с пониженной температурой стенок без химических реакций, область теплоотдачи от газовой смеси к стенкам в зоне поглощения лазерного излучения, область теплоотдачи от стенок трубы в газопылевую смесь.

Проведена серия расчетов с мощностью излучения 0 Вт, 15 Вт, 30 Вт, 60 Вт. Получено, что с увеличением мощности излучения температура в центральной части трубы растет. Также с ростом мощности отмечено расширение области поглощения лазерного излучения, повышенной температуры смеси и концентрации атома водорода. Конверсия метана увеличилась с 52% при нулевой мощности до 75% при 60 Вт с образованием в первую очередь ароматических соединений, массовые доли первичных углеводородов остались почти неизменными при заданных расчетных начальных и граничных условиях.

Список литературы:

1. Snytnikov V.N., Peskova E.E., Stoyanovskaya O.P. Mathematical Model of a Two-Temperature Medium of Gas–Solid Nanoparticles with Laser Methane Pyrolysis // Mathematical Models and Computer Simulations. 2023. Vol. 15, Iss. 5. P. 877-893.
2. Пескова Е.Е., Снытников В.Н., Жалнин Р.В. Вычислительный алгоритм для изучения внутренних ламинарных потоков многокомпонентного газа с разномасштабными химическими процессами // Компьютерные исследования и моделирование. 2023. Т. 15, № 5. С. 1169-1187.
3. Lashina E.A., Peskova E.E., Snytnikov V.N. Mathematical modeling of the homogeneous-heterogeneous non-oxidative CH4 conversion: the role of gas-phase H or CH3 // Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis. 2023. Vol. 136. P. 1775-1789.

Работа Песковой Е.Е. выполнена за счет гранта Российского научного фонда, проект № 23-21-00202.

УДК 629.7.036.54

ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ САМОВОСПЛАМЕНЯЮЩИХСЯ КОМПОНЕНТОВ ТОПЛИВ

Плешко А.О., Глушков Д.О.

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

В настоящее время на практике применяется широкое разнообразие топлив и энергоресурсов как органического, так и синтетического происхождения. В большинстве случаев энергия таких топлив выделяется в результате химической реакции при протекании процесса горения [1]. Применительно к авиакосмической отрасли самовоспламеняющиеся топливные системы на основе жидких горючего и окислителя достаточно широко применяются для инициирования и организации процесса горения в камерах сгорания [2]. Химическое реагирование в таких системах с выделением тепловой энергии протекает при непосредственном контакте компонентов без подвода теплоты от внешнего источника [3]. При применении самовоспламеняющихся топлив горючее и окислитель взаимодействуют в виде двух набегающих струй. При их распылении происходит самовоспламенение и распространение пламени по смеси капель топлива и окислителя. Для успешного воспламенения необходимо, чтобы капли топлива и окислителя вступили в контакт, поэтому процесс взаимодействия между каплями становится ключевым фактором для стабильного горения [4] и требует комплексного подхода к его изучению. Таким образом, целью данной работы является установление по результатам экспериментальных исследований основных закономерностей и характеристик процессов горения самовоспламеняющихся компонентов топлив при их взаимодействии.

В качестве жидких компонентов самовоспламеняющихся топлив были использованы тетраметилэтилендиамин $C_6H_{16}N_2$ (горючее) и высококонцентрированная (86–95%) азотная кислота HNO_3 (окислитель).

Исследование закономерностей и характеристик процессов горения самовоспламеняющихся компонентов топлив выполнено в лабораторных условиях (температура 22–25 °С, атмосферное давление, относительная влажность 45%) с использованием экспериментального стенда, состоящего из следующих основных элементов: штатива с закрепленным на нем дозатором; стеклянной поверхности; светодиодного прожектора; высокоскоростной видеокамеры. Во время проведения эксперимента капля топлива (V_1=10 мкл) с помощью дозатора сбрасывалась на каплю окислителя (V_2=10 мкл), находящуюся на стеклянной поверхности, с высоты 20 см. Процессы, протекающие при воспламенении, регистрировались высокоскоростной видеокамерой.

При проведении серий из 5 экспериментов при идентичных начальных условиях регистрировались времена задержки зажигания (t_d) топлив, средние значения скоростей движения (V_p) мелкодисперсных капель, образующихся при контакте горючего и окислителя, областей выгорания (S) топлива. Полученные видеозаписи обрабатывались с применением коммерческого ПО [5].

На рисунке 1 представлены типичные кадры видеограмм зажигания и горения самовоспламеняющихся компонентов топлив.

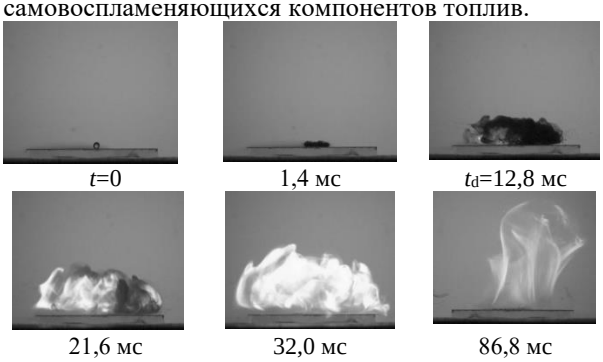


Рис. 1. Типичные кадры видеограммы зажигания и горения при взаимодействии капель горючего (V_1=10 мкл) и окислителя (V_2=10 мкл).

Процесс взаимодействия компонентов можно разделить на три основных этапа: жидкофазную реакцию, газофазную реакцию и зажигание. Вследствие химической реакции компонентов топлив выделяется большое количество теплоты, которое приводит к формированию горючих паров и к последующему их воспламенению. При контакте капель $C_6H_{16}N_2$ и HNO_3 время задержки зажигания составляет 12,8 мс. Стоит отметить, что взаимодействие компонентов (горючего и окислителя) сопровождается формированием мелкодисперсных капель, разлетающихся в разных направлениях, при этом их скорость варьируется в пределах от 1 до 3 м/с. Выгорание компонентов происходит в относительно большой по размерам области (по сравнению с первоначальным размером капель) и составляет около 31,3 см^3.

Полученные результаты являются основной для развития теории зажигания и горения самовоспламеняющихся топливных систем с гелеобразными компонентами.

Список литературы:

1. Ao W., Fan Z., Gao Y., Wang Y., Liu P., Li L.K.B. Ignition and combustion characteristics of boron-based nanofluid fuel. Combust Flame. 2023. V. 254. Article number 112831.
2. Li J., Weng X., Tang C., Zhang Q., Fan W., Huang Z. The ignition process measurements and performance evaluations for hypergolic ionic liquid fuels: [EMIm][DCA] and [BMIm][DCA]. Fuel. 2018. V. 215. P. 612–618.
3. Mota F.A.S., Fei L., Tang C., Huang Z., Costa F.S. Hypergolic ignition behaviors of green propellants with hydrogen peroxide: The TMEDA/DMEA system. Fuel. 2023. V. 336. Article number 127086.
4. Padwal M.B., Natan B., Mishra D.P. Gel propellants. 2021. V. 83. Article number 100885.
5. Glushkov D.O., Paushkina K.K., Pleshko A.O., Yanovsky V.A. Ignition and combustion behavior of gel fuel particles with metal and non-metal additives. Acta Astronaut. 2023. V. 202. P. 637–652.

УДК 534.222.2

ДЕТОНАЦИОННННОЕ СЖИГАНИЕ СТРАТИФИЦИРОВАННОГО ГАЗОВОГО ЗАРЯДА, КОНТАКТИРУЮЩЕГО С ВОЗДУХОМ

Прохоров Е.С.

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15

Современные установки для детонационного напыления могут работать не только при полностью заполненном взрывчатой смесью стволе, но и при некотором его недозаполнении, когда оставшуюся часть ствола занимает инертный газ, например, воздух или азот. В этом случае после инициирования детонации стратифицированного газового заряда у закрытого конца ствола и выхода сформированной детонационной волны (ДВ) на контактную границу (взрывчатая смесь – инертный газ) по инертному газу будет распространяться ударная волна (УВ). При недозаполнении частицы, поступившие в ствол из дозатора порошка, могут некоторое время находиться в ударно-сжатом инертном газе. Остальное время, перед вылетом из ствола они ускоряются потоком продуктов детонации. При математическом описании таких газодинамических процессов обычно пренебрегают возможным перемешиванием взрывчатого (химически реагирующего) и инертного газов, т. е. полагают, что на контактной границе (КГ) между этими газами происходит резкое изменение концентрации химических веществ. В связи с этим при преломлении детонации на КГ начальные параметры нестационарной УВ определяют из решения задачи о распаде произвольного разрыва между продуктами детонации и невозмущенным инертным газом.

Однако в реальных условиях при проточной подаче заряда взрывчатой смеси в ствол такая математическая постановка задачи не совсем корректна. По оценкам, полученным на основе анализа экспериментальных данных [1], протяженность зоны перемешивания для двух контактирующих газов может достигать пяти калибров ствола.

Это означает, что в области перемешивания имеется градиент концентрации химических веществ, и процесс трансформации ДВ в УВ не может быть мгновенным. Поэтому для его описания предлагается воспользоваться предложенным в работе [2] унифицированным подходом к моделированию равновесных течений детонирующих газов. Он сформулирован на основе развитой приближенной модели равновесия, которая позволяет получать численные решения при детонации газовых смесей с различными соотношениями между углеводородным топливом и окислителем. Как следует из [3], его можно применять с определенной степенью достоверности и для моделирования поведения УВ, возбуждаемых при взрывах.

Когда избыточное заполнение ствола взрывчатой смесью малоэффективно [1], то обычно дозатор частиц располагается непосредственно около КГ. Понятно, что расчетная газодинамическая картина течения в этой области будут различна в зависимости от предположения: КГ бесконечно тонкая или она «размытая». Заранее предсказать насколько будет отличаться динамический напор и температура газового потока на начальном этапе разгона и нагрева частиц невозможно без дополнительного численного исследования. Здесь под начальным этапом работы детонационной установки понимается временной интервал между инициированием детонации и началом истечения газа из ствола. Это позволит в дальнейшем определиться с вопросом: корректировки модели, описывающей внутреннюю баллистику частиц в стволе детонационной установки.

В связи с этим, в настоящей работе проведены расчеты параметров газодинамического течения при детонации стратифицированного заряда, контактирующего с воздухом, в прямом (постоянного диаметра) стволе, при условиях аналогичных, как в экспериментах [1]. Так полагали, что ствол диаметром 16 мм и длинной 1.3 м при стандартных условиях частично заполнен взрывчатой смесь $C_2H_2 + O_2$. Объем такого взрывчатого заряда при заполнении соответствовал объему ствола от жесткой стенки (с координатой $x = 0$) до места расположения дозатора частиц ($x = 1$ м). Ширина области размытия КГ Δl составляла 80 мм

Выполнен сравнительный анализ численного решения для двух случаев: когда зона перемешивания бесконечно тонкая; и когда она имеет конечную ширину.

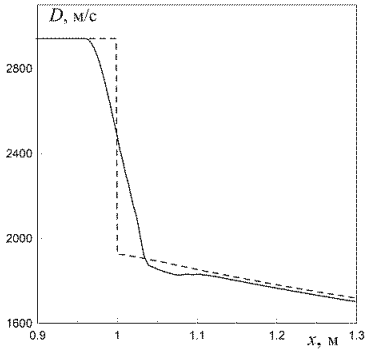


Рис. Динамика скорости фронта D при трансформации ДВ в УВ. Пунктирная линия – расчет при $\Delta l = 0$

Список литературы:

1. Батраев И.С., Прохоров Е.С. Совершенствование технологии детонационного напыления за счет профилирования ствола установки// УТиП. 2018. № 6. С. 252–256.
2. Прохоров Е.С. Унифицированный подход к моделированию равновесных течений детонирующих газов// ИФЖ. 2023. Т. 96. № 3. С. 671-681.
3. Прохоров Е.С. Возбуждение ударных волн при переходе детонации через область перемешивания реагирующего и инертного газов // ИФЖ. 2018. Т. 91. № 1. С. 162-171.

УДК 532.517.2:536.24

ТЕПЛООБМЕН ХИМИЧЕСКИ АКТИВНОЙ СРЕДЫ СО СТЕНКАМИ ПРЯМОЙ ТРУБЫ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ

Пескова Е.Е.[1], Снытников В.Н.[2]

[1] Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва,
430005, Россия, Саранск, ул. Большевистская, 68
[2] Институт катализа имени Г. К. Борескова СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 5

В работе проведено численное исследование ламинарного двухфазного потока метана и каталитических наночастиц в прямой обогреваемой трубе круглого сечения в условиях протекания гетерогенно- гомогенных химических реакций. Расчеты проведены на основе нестационарной системы уравнений вязкой газопылевой двухфазной среды с химическими реакциями [1]. Для описания химических превращений использована гетерогенно-гомогенная схема радикально-цепных реакций конверсии метана [2].

Нами детально исследован режим, при котором газ и частицы прогреваются по всему объему от стенки трубы. Наличие гетерогенно- гомогенных реакций приводит к высоким, свыше 50\%, конверсиям метана и к появлению водорода, этилена и других углеводородов в химическом составе газа. Тем самым, реакционная среда меняет свою вязкость и теплопроводность. Течение двухфазной среды значительно отклоняется от течения Пуазейля однокомпонентного газа в силу изменения объема и вязкости.

Энергоемкая химическая конверсия метана определяет повышение числа Нуссельта до 6.4 в сравнении с течением однокомпонентного газа с коэффициентом теплоотдачи 3.7 без химических превращений. Исследование тепловых режимов по длине трубы в диапазоне чисел Рейнольдса 9.7 - 40.6 показало рост теплообмена между стенками трубы и газопылевым потоком с числами Нуссельта 6.03 - 6.85.

Численные расчеты с изменением температуры стенок, энергии активации метана на частицах, концентрации и размера частиц, расхода смеси и диаметра трубы позволили выявить диапазоны их значений, в которых физически обоснованы получаемые решения для нашей модели двухфазной реакционной среды с конверсией метана. Найдено, что энергия активации ниже 140 кДж/моль обеспечивает высокую конверсию метана на каталитических наночастицах. Совершенствование катализаторов может вестись в направлении достижения еще меньших энергий активации метана. Существенное влияние на гетерогенную часть химического процесса оказывают размер и концентрация наночастиц через изменение удельной каталитической поверхности. Получена конверсия метана 52% при диаметре частиц 10 нм и концентрации 10^{19} $м^{-3}$. Изменение температуры стенок в диапазоне от 1073 К до 1173 К показало высокую чувствительность гетерогенно-гомогенного химического процесса к температуре среды с ростом конверсии метана с 33% до 74% и высокими выходами этилена и водорода.

С понижением расхода и увеличением времени нахождения в трубе происходит рост конверсии метана. Качественно похожие результаты показывают расчеты с уменьшением диаметра трубы. Однако, общая производительность по целевым продуктам в случае низких расходов и узких труб понижается. Этот эффект не играет большую роль для лабораторных исследовательских реакторов с ламинарными течениями реагентов. Однако в случае опытно-демонстрационных реакторов выбор оптимальной производительности потребует своего изучения для управления химическим процессом с помощью изменения скорости подачи реакционной смеси или размеров труб.

Список литературы:

1. Snytnikov V.N., Peskova E.E., Stoyanovskaya O.P. Mathematical Model of a Two-Temperature Medium of Gas–Solid Nanoparticles with Laser Methane Pyrolysis // Mathematical Models and Computer Simulations. 2023. Vol. 15, Iss. 5. P. 877-893.
2. Lashina E.A., Peskova E.E., Snytnikov V.N. Mathematical modeling of the homogeneous-heterogeneous non-oxidative CH4 conversion: the role of gas-phase H or CH3 // Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis. 2023. Vol. 136. P. 1775-1789.

УДК 536.46

ГОРЕНИЕ МЕТАНА С ДОБАВЛЕНИЕМ МИКРОКАПЕЛЬ ВОДЫ В СЛАБОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

А.В. Тупикин, В.М. Дулин, Д.К. Шараборин

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

Одним из приоритетных направлений мировой науки является поиск решений, обеспечивающих экологическую безопасность и высокую эффективность энергетических установок на углеводородных топливах. Устройства, работающие на жидких топливах в виде спреев и аэрозолей, рассматриваются как перспективные схемы организации горения. При этом не редко встречаются предложения использовать электрические поля для управления горением в них [1-3].

В работе рассмотрено ламинарное пламя горелки Бунзена предварительно перемешанной смеси метан-воздух с добавлением микро-капель воды. Пламя размещалось между двух параллельных пластин, на которые подавалось постоянное напряжение. Для регистрации полей скорости применялась разработанная в ИТ СО РАН PIV-система на основе камеры ImperX (16 Мпикс) и двухканального импульсного Nd:YAG лазера Beamtech Vlite 200. Положение фронта пламени определялось по регистрации сигнала хемилюминисценции радикала OH с использованием камеры Nikon D7100.

Исследования проводились на лабораторной горелке аксиальной симметрии, где было установлено сужающееся сопло с выходным диаметром D =15 мм, имеющее профиль Витошинского. На диэлектрической площадке располагались плоскопараллельные электроды, нижний край которых находился на уровне среза сопла. В опытах с аэрозолем, состоящем из микро-капель воды в воздушно-метановой смеси, поток смеси с микро-капелями создавался путем прокачки сухого воздуха через резервуар с водой, на дне которого располагался ультразвуковой атомизатор KERI M1009-2, генерирующий сигнал на частоте 1.7 МГц. Контроль расхода воздуха осуществлялся с помощью расходомеров «Bronkhorst El-Flow» с погрешностью не более 1%.

Из полученных распределений скорости и положения фронта горения определялась скорость распространения ламинарного пламени. Установлено, что со стороны катода при наложении внешнего поля она немного возрастает, оставаясь неизменной со стороны анода. Обнаружилось, что вдоль линий тока в области, ограниченной пламенем, компонента скорости, направленная вдоль оси потока, сохраняется, а поперечная является функцией расстояния от среза горелки. В случае ударного профиля скорости на выходе горелки Бунзена поперечная компонента скорости зависит как: $u_x(y)\big|_{л.т.} = a(x_0)y^2$, где y – координата вдоль оси потока, x – поперек, а x_0 начало линии тока от среза горелки (y=0). Определены зависимости как для газообразного метана, так при добавлении микро-капель воды.

Используя полученные распределения скорости вдоль фронта горения, были вычислены изменения гидродинамического напора, связанные с наложением электрического поля. Так как в пламени достаточно носителей заряда для экранирования, то можно рассматривать процесс взаимодействия пламени с внешним электрическим полем в рамках модели «наведенного на фронте горения заряда». Тогда распределение наведенного внешним электрическим полем заряда на фронте пламени: $\Delta n_i = \sqrt{\dfrac{\rho_0 u_x^2}{\varepsilon_0 e \delta_F}}$, где ρ_0 – плотность топливно-воздушной смеси, δ_F – толщина фронта ламинарного пламени, e – заряд электрона, ε_0 – электрическая постоянная.

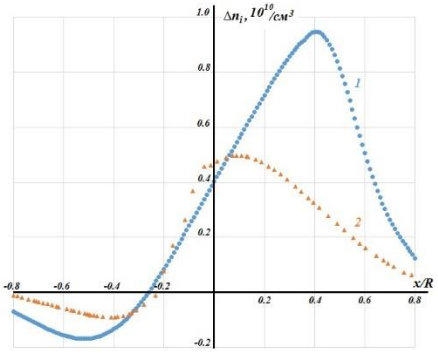


Рис. 1. Распределение наведенного полем заряда на фронте пламени: *1* – метан и *2* – газокапельная смесь.

На рис.1 представлены результаты оценки по распределению наведенного внешним электрическим полем заряда, которые свидетельствуют о существовании эффектов, вызванных дрейфом отрицательных ионов. Введение микро-капель воды в состав топлива снижает концентрацию носителей заряда. Высота пламени возрастает, что свидетельствует об уменьшении величины скорости распространения пламени, возможно вызванное понижением температуры в зоне реакции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-19-00803). Оборудование предоставлено в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

Список литературы:

1. Starikovskiy A, Aleksandrov N. Plasma-assisted ignition and combustion //Progress in Energy and Combustion Science. 2013. N.39. P.61-110.
2. Jianfeng Fang, Xiaomin Wu, Hao Duan, Chao Li and Zhongquan Gao Effects of electric fields on the combustion characteristics of lean burn methane-air mixtures // Energies. 2015. V.8. P. 2587-2605.
3. Chien, Y.-C., Escofet-Martin, D., Dunn-Rankin, D. Ion current and carbon monoxide release from an impinging methane/air coflow flame in an electric field // Combustion and Flame. 2019. V. 204. –P. 250-259

УДК 621.18

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДИСПЕРСНОГО РАБОЧЕГО ТЕЛА ДЛЯ МАЛОЭМИССИОННОГО ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА

Федоров Р.В., Шепелев И.И., Малешина М.А., Карпов Д.А., Селезнев К.А.

Лаборатория междисциплинарных проблем энергетики Ульяновского государственного технического университета,432027, Россия, Ульяновск, ул. Северный Венец, 32

В настоящее время энергетика является основным двигателем в мировой экономике и эффективность процессов производства и потребления энергии оказывают ключевое воздействие на состояние общества и окружающей среды. В соответствии с Шестым оценочным докладом Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) [1], мир уже не может предотвратить экстремальные климатические изменения: необходимый эффективный сценарий IEA не выдерживается. Реализация этого сценария возможна с совершенствованием существующих и разработкой новых энергоэффективных технологий производства и преобразования энергии на органическом и синтетическом углеводородном топливе. В то же время современные экологические нормы уже привели к значительному увеличению и усложнению рабочих процессов, осуществляемых в современных энергоустановках и комплексах. В большинстве случаев это привело к ухудшению технико-тактических характеристик энергоустановок, что в свою очередь приводит в противоречие с требованиями топливной эффективности.

Основным фактором в разрешении этого противоречия и обосновании перспективных технологий экологически чистой ресурсосберегающей энергетики является решение фундаментальной проблемы познания закономерностей процессов формирования кластеров дисперсной фазы, гидрогазодинамики, тепломассопереноса в потоках рабочего тела. Формирование этих кластеров происходит под воздействием множества различных факторов (в условиях интенсивных воздействий градиента давления, факторов тепловой и динамической нестационарности, фазовых переходов, химических реакций и др.). Это может происходить как пассивно (попутным процессом), так и активно (твёрдые частицы или капели жидкости специально вносят в рабочее тело для технологических нужд). Присутствие дисперсности в рабочем теле существенно осложняет тепломассообменные процессы в потоке и взаимодействие с обтекаемой поверхностью. Вместе с тем при движении дисперсного потока в каналах и около поверхностей сложной формы создаются условия для поперечного перемещения частиц дисперсного кластера в пограничном слое и их инерционного выпадения на отдельные участки поверхности, что многократно интенсифицирует обменные процессы и является значимым резервом повышения топливной эффективности и улучшения экологических показателей перспективной теплотехники.

Существующие методы ввода влаги в топку различаются по агрегатному состоянию влаги, способам ее распыливания и конструктивным исполнением [2]. Результативность воздействия на образование оксидов азота напрямую зависит от применяемого метода. К не оспоримым достоинствам методов с вводом влаги в область образования оксидов азота относятся низкие капитальные затраты и возможность применения независимо от других применяемых конструктивных и организационно-технических мероприятий. Недостатком данного метода является увеличение потерь тепла с уходящими газами.

Для моделирования и исследования была создана цифровая модель горелочного устройства действующего энергетического котла. Моделирование выполнено в среде STAR-CCM+. Построена твердотельная модель горелочного устройства. Для расчетов сгенерирована расчетная сетка. Вычислительная область представляет собой несколько зон: наиболее плотная сетка в области смешения и закрутки потоков топливовоздушной смеси (3% от базового размера сетки); следующая менее плотная зона вдоль оси горелки в центре камеры сгорания (10% от базового размера сетки); в остальной части камеры сетка с базовым размером. Для получения адекватных результатов в качестве исходных данных была использована карта режимов действующего энергетического котла.

Результатом модернизации горелочного устройства стало повышение экологической эффективности при сжигании газа в горелке за счет снижения выбросов оксидов азота путем добавления влаги через трубу паромеханической форсунки, распылительная часть которой расположена в амбразуре горелки.

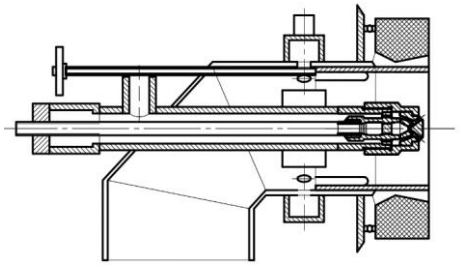


Рис. 1. Горелка с дисперсным рабочим телом

Список литературы:

1. Pörtner H. O. et al. IPCC, 2022: Summary for policymakers. – 2022.
2. Алехнович А. Н. Снижение оксидов азота в энергетических котлах, сжигающих газ: Учебное пособие.- А. Н. Алехнович. — Челябинск : Цицеро, 2018. — 74 с

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

УДК 536.46

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ В ЛАМИНАРНОМ ПЛАМЕНИ БУНЗЕНА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Шараборин Д.К.[1], Толстогузов Р.В.[1], Савицкий А.Г.[1], Дулин В.М.[1]

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

Исследования механизмов воздействия электрического поля на потоки с горением и методов влияния на процессы стабилизации пламени ведутся уже около ста лет [1–3]. Большой интерес представляет организация горения в электрическом поле в связи с возможностью использования поля для повышения устойчивости пламени [4]. В литературе представлено мало работ, содержащих информацию о распределении как скорости, так и температуры в реагирующих течениях во внешнем электрическом поле, в то время как основной акцент в исследованиях посвящен влиянию поля на скорость распространения пламени. Направление вектора напряженности электрического поля влияет на направление движения ионов (в случае низких напряжений), что особенно заметно во фронте пламени [5], где наблюдается высокая концентрация ионов. Таким образом растягивая/сжимая или отклоняя фронт пламени можно как влиять на структуру течения за фронтом пламени, так и способствовать его стабилизации или уносу.

При исследовании структуры течений с горением, измерений распределения скорости в потоке недостаточно в виду скачкообразного изменения параметров газа за фронтом пламени. Метод плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции (ПЛИФ) позволяет измерить мгновенные распределения температуры в потоке с горением, не внося значительных возмущений в поток. Более того, с использованием метода ПЛИФ в ламинарном пламени возможно локализовать положение фронта пламени, что при условии наложения малого по напряженности электрического поля позволяет визуализировать непосредственно воздействие поля на фронт пламени.

В работе проведена оценка распределения температуры, измерения распределения скорости, а так же положения фронта пламени в ламинарном пламени Бунзена смеси метан-воздух для исследования влияния постоянного электрического поперечного поля на структуру потока.

Ламинарное коническое предварительно перемешанное пламя Бунзена смеси метан/воздух формировалось сужающимся соплом с профилем Витошинского, что обеспечивало ударный профиль скорости на срезе сопла. Электрическое поле было организовано двумя параллельными металлическими пластинами, установленными вблизи сопла таким образом, чтобы линии напряженности электрического поля были перпендикулярно направлены потоку газа из сопла. При помощи высоковольтного источника питания на пластины-электроды подавалось напряжение U = 2.5 кВ, что соответствует напряженности электрического поля E = 62.5 кВ/м (при расстоянии 40 мм между электродами) в приближении плоского конденсатора. Число Рейнольдса составляло Re = 1000 и определялось по среднерасходной скорости и вязкости воздуха при комнатной температуре. Коэффициент избытка топлива был равен φ = 0.92.

Экспериментальное исследование структуры течения проведены в продольном сечении потока, проходящем через ось симметрии сопла. Измерения поля скорости осуществлены методом анемометрии по изображениям частиц с использованием одной камеры ImperX Bobcat IGV-B4820 и двухканального лазера Beamtech Vlite-200. Для оценки температуры за фронтом пламени был использован метод «Two-line» OH ПЛИФ, основанный на регистрации интенсивностей сигналов флуоресценции молекул радикала OH, полученных при возбуждении двумя вспышками лазера, с длинами волн, соответствующих двум переходам $Q_1(5)$ и $Q_1(14)$ полосы (1–0) электронной системы $A^2\Sigma^+–X^2\Pi$. Отношение интенсивности сигналов флуоресценции соотносится с температурой в соответствии с населенностью энергетических уровней по распределению Больцмана. Визуализация положения фронта пламени получена на основании определения максимального градиента сигнала флуоресценции при возбуждении перехода $Q_1(5)$.

Полученные данные показывают изменение формы конуса пламени, особенно в верхней части конуса, где происходит скругление и отклонение к катоду. Так же наблюдается уширение области продуктов горения за фронтом пламени и появление пульсаций продольной скорости на оси струи. Не смотря на влияние на положение фронта пламени и поле скорости, наложение электрического поля не оказывает заметного эффекта на значения температуры за фронтом пламени.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

Список литературы:

1. Лаутон Д., Вайнберг Ф. Электрические аспекты горения. Москва : Энергия. 1976. 186 с.
2. Лавров Ф. А., Малиновский А. Э. Влияние продольного электрического поля на процесс горения газовых смесей //Журнал Физической Химии. 1933. Т. 4. №. I. С. 104.
3. Малиновский А. Э., Егоров К. Е. Влияние электрического поля на процессы горений при пониженных давлениях //Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. 1934. Т. 4. №. 2. С. 208.
4. Starikovskaia S. M. Plasma assisted ignition and combustion //Journal of Physics D: Applied Physics. 2006. Т. 39. №. 16. С. R265.
5. Tretyakov P. K., Tupikin A. V., Denisova N. V. et al. Laminar propane-air flame in a weak electric field //Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2012. Т. 48. С. 130-135.

Секция 6 Процессы в разреженных газах и плазме

УДК 533.5, 533.7

ЭЖЕКЦИЯ ПЫЛЕВОЙ ЧАСТИЦЫ С ПОВЕРХНОСТИ КАВЕРНЫ, ЗАПОЛНЕННОЙ ГАЗОМ

Быков Н.Ю.[1], Захаров В.В.[1,2], Керестень И.А.[1], Никитин М.А.[1], Образцов Н.В.[1]

[1] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, Россия, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
[2] Observatoire de Paris,75014, France, Paris, avenue de l'Observatoire, 61

Задача об уносе частиц пыли газовым потоком с пористой поверхности имеет непосредственное отношение к исследованиям околоядерной газопылевой атмосферы комет.

Одним из основных вопросов формирования пылевой комы кометы является определение механизмов эжекции пылевых частиц с поверхности ядра и формирование пылевого течения в приповерхностном слое [1-3]. Следует отметить, что в этом контексте пыль – достаточно общее понятие. Под этот термин подпадает любой объект, содержащий некоторое включение твердой фазы. Размеры пыли варьируются в широких пределах от долей микрометра до нескольких сантиметров.

Для анализа и предварительных оценок важности процессов удобно использовать упрощенные модели с минимальным количеством параметров и, по возможности, имеющие аналитические и/или асимптотические решения.

Задача о разгоне/метании тел газовым потоком относится к классическим задачам газовой динамики. В частности, такая задача решена для движения поршня в канале бесконечной или ограниченной длины [4]. Задача о движении пылинки с поверхности каверны тем не менее имеет ряд особенностей, заключающихся в отсутствии движения по каналу. Начало движения пылинки происходит непосредственно от выходного сечения каверны и сопровождается истечением газа из нее. Начальная энергия газа в каверне переходит как в кинетическую энергию пылинки, так и в кинетическую энергию потока, формирующегося при истечении в окружающую среду (вакуум или разреженный поток). По мере опустошения каверны и удаления пылинки от поверхности влияние газового потока на динамику частицы уменьшается, и частица достигает конечной скорости. Интерес представляют доля энергии газа, переходящая в кинетическую энергию частицы и ее конечная скорость как функции параметров частицы и начальных параметров газа в каверне.

В рассматриваемой постановке предполагается, что каверна имеет ограниченный объем без подвода газа и заданными в начальный момент давлением p_0 и температурой T_0 газа. Задача решается в осесимметричной постановке. Известны геометрические размеры каверны, размер и масса пылевой частицы. Определение аэродинамической силы, разгоняющей пылинку требует расчета параметров возникающего течения. В рассматриваемом диапазоне начальных параметров газа в каверне и размеров частиц необходимо учитывать кинетические эффекты возникающие в течении. Численные расчеты выполнены как с использованием метода DSMC (the Direct Simulation Monte Carlo method), так и с использованием сплошносредного подхода, основанного на решении системы уравнений Навье-Стокса.

В работе подробно рассмотрены различные режимы движения газа возникающие после отрыва пылинки от поверхности.

Результаты моделирования показывают зависимость конечной скорости пылевой частицы от отношения начальной массы газа в каверне и массы частицы, геометрических размеров задачи и начальных параметров газа в каверне. Приводятся характерные линейные и временные масштабы процессов истечения из каверны и разгона частицы. Также анализируется влияние гравитации на динамику пылинки.

Анализируется адекватность подобного механизма эжекции твердых частиц применительно к задачам астрофизики.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант №24-12-00299).

Список литературы:

1. Jutzi M., Michel P. Collisional heating and compaction of small bodies: Constraints for their origin and evolution // Icarus, 2020, 350, pp. 113867.
2. Fulle M., Blum J. and Rotundi A. How Comets Work // The Astrophysical Journal Letters, 2019, pp. 879:L8.
3. Fulle M., Blum J., Rotundi A., Gundlach B., Guttler C. and Zakharov V. How comets work: nucleus erosion versus dehydration // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2020, 493, pp. 4039–4044.
4. Станюкович К.П. Неустановившиеся движения сплошной среды. М.: Наука, 1971. 856 с.

УДК 533.5, 533.7

ОБРАЗОВАНИЕ МАЛЫХ КЛАСТЕРОВ В СВЕРХЗВУКОВЫХ СТРУЯХ, ИСТЕКАЮЩИХ В ВАКУУМ ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Горбачев Ю.Е.[1], Быков Н.Ю.[2], Деринг Е.Д.[1]

[1] Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2
[2] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, Россия, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

Разработка надежной модели образования субнаноразмерных кластеров с числом мономеров порядка координационного числа N является крайне важной задачей. Динамика формирования малых кластеров предопределяет весь последующий процесс конденсации, ее корректное описание необходимо для правильной оценки параметров процесса кластерообразования в целом. Классическая теория нуклеации (КТН) не может быть использована в ситуациях, когда критический размер кластера приближается к первому координационному числу. К настоящему времени было предложено несколько моделей, описывающих такое распределение [1-4]. Подход с коррекцией размера [2] был реализован в коде DSMC [5], однако недостатком такого подхода является то, что для кластеров размером меньше N соответствующее изменение свободной энергии Гиббса не зависит от размера кластера g. Это соответствует независимости энергии связи мономер-кластера от g.

Основываясь на подходе модели квазихимической нуклеации (КХМН) и применении теории мономолекулярных реакций [1], мы предлагаем модель, которая преодолевает вышеупомянутую проблему. Выраженная через константу димеризации K_{c2}, константа равновесия g-мера аргона может быть записана в следующем виде:

$$K_{cg} = K_{c2} \cdot \exp\left\{\frac{2}{3}\frac{947.4(\mathrm{K})}{T}\left(\frac{1}{2^{1/3}} - \frac{1}{g^{1/3}}\right) + \frac{1}{3}\frac{482.4(\mathrm{K})}{T}\left(\frac{1}{2^{2/3}} - \frac{1}{g^{2/3}}\right)\right\}.$$

Данная модель реализована в сплошносредном коде, основанном на решении системы уравнений Навье-Стокса. Расчеты проведены для сверхзвукового сопла [6]. Выполненное численное исследование показало существенно более раннюю кластеризацию при использовании предложенной константы равновесия по сравнению с результатами, полученными с использованием приближения из [2].

Часть расчетов выполнена для звукового сопла и малых давлений торможения ($P_0 < 0.4$ атм). Для рассмотренных режимов течения теоретические оценки предсказывают средний размер кластера $g_{\mathrm{av}} \lessapprox N$. Ограниченный размерный спектр кластеров позволяет учесть энергию связи напрямую, не прибегая к аппроксимации зависимости энергии от размера кластера, использованной выше при выводе представленного выражения для $K_{c,g}$. Соответственно, выражение для константы равновесия упрощается. Численное моделирование в рассматриваемой постановке выполнено методом DSMC.

С целью верификации результатов моделирования на лабораторном газодинамическом стенде ЛЭМПУС-2 Новосибирского государственного университета [7] проведена серия экспериментов по истечению аргона в разреженную среду (вакуум) из звуковых и сверхзвуковых сопел. Получены и сопоставлены данные как о распределении плотности газа вдоль оси течения, так и о размерном распределении кластеров в молекулярном пучке, вырезаемом скиммером в дальнем поле струи. Сравнение показало хорошее согласие экспериментальных и расчетных распределений плотности газа. В работе обсуждаются причины наблюдаемых расхождений в размерных распределениях. В частности, рассмотрено влияние электронного пучка, используемого в диагностическом методе, на процесс ионизации кластеров и их распад, а также возможная роль газодинамических процессов при формировании молекулярного пучка.

Работа выполнена в Новосибирском государственном университете с использованием оборудования ЦКП "Прикладная физика" при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант №22-11-00080).

Список литературы:

1. Гордиец Б.Ф., Шелепин Л.А., Шмоткин Ю.С. Кинетика изотермических процессов гомогенной конденсации // Труды ФИАН: Кинетика низкотемпературной плазмы и газовые лазеры. 1984. Т. 145. С. 189–219.
2. Zhukhovitskii D.I. Size-corrected theory of homogeneous nucleation // J. Chem. Phys. 1994 Vol. 101, Iss. 6, P. 5076–5080.
3. Егоров Б.В., Маркачев Ю.Е. Коррекция квазихимической кластерной модели нуклеации при при сопоставлении с экспериментом // Химическая физика 2006. Т. 25, № 11. С. 77–83.
4. Savel'ev A.M., Starik A. M. An improved model of homogeneous nucleation for high supersaturation conditions: aluminum vapor // Phys. Chem. Chem. Phys., 2017, Vol. 19, P. 523-538.
5. N.Y. Bykov, Yu.E. Gorbachev. Cluster formation in copper vapor jet expanding into vacuum: the direct simulation Monte Carlo// Vacuum. 2019, Vol.163, P.119–127.
6. Bykov N.Yu., Gorbachev Yu.E. Fyodorov S.A., Highly underexpanded rarefied jet flows // Front. Mech. Eng. 2023, 9:1216927.
7. Zarvin A.E. et.al. Condensable supersonic jet facility for analyses of transient low-temperature gas kinetics and plasma chemistry of hydrocarbons // IEEE Trans.Plas.Sci. – 2017. – V.45. – P.819-827.

УДК 533.599, 533.17, 536.511, 539.198, 544.277.6

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРАЩАТЕЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В СВЕРХЗВУКОВОМ КЛАСТИРОВАННОМ ПОТОКЕ

Деринг Е.Д.[1, 2], Дубровин К.А.[1], Зарвин А.Е.[1], Каляда В. В.[1]

[1] Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2
[2] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Исследование кластированных сверхзвуковых потоков в настоящее время является одним из перспективных направлений в газодинамике. С одной стороны, это обусловлено тем, что такие потоки нашли широкий спектр различных практических применений [1-2]: модификация различных поверхностей и их химических свойств, сверхгладкая полировка и имплантация легирующих примесей на небольшую глубину и т.д. С другой стороны, важность фундаментальных исследований кластированных потоков обуславливается возможностью использования малогабаритных газодинамических стендов для моделирования истечения продуктов сгорания топлива из сопел космических аппаратов при комнатных температурах, что значительно снижает стоимость данного процесса.

В работах различных научных коллективов было продемонстрировано, что развитие конденсации в потоке приводит к искажению изоэнтропичности течения: наблюдается заметное изменение размеров потока [3], изменение массового и плотностного распределения [4-5], искажение структуры струи и формирование так называемого “кластерного следа” [6]. Одним из факторов, предположительно влияющих на газодинамику истечения, является выделение в поток скрытой теплоты конденсации. Для детального изучения влияния процесса конденсации на параметры сверхзвукового неравновесного потока необходимо иметь достоверные экспериментальные методы, позволяющие определять температуру в разреженной газовой струе.

Существуют различные методики определения температуры частиц в сверхзвуковом газовом потоке: времяпролетный метод измерения функции распределения частиц по скоростям [7], из которой вычисляется поступательная температура, метод допплеровского уширения спектральных линий [8], а также метод определения поступательной температуры по поперечным профилям плотности молекулярного пучка. В настоящей работе для исследования температурного распределения в разреженных кластированных потоках на газодинамическом стенде ЛЭМПУС-2 был адаптирован широко известный метод электронно-пучковой спектроскопии [9-10], получивший активное развитие в конце прошлого века в работах различных научных коллективов [11-16], позволяющий определять температуру частиц по вращательным спектрам. Для решения поставленной задачи в поток была добавлена примесь молекулярного азота. Измеренная данным методом вращательная температура может характеризовать локальную поступательную температуру газа, поскольку количество парных столкновений частиц в сверхзвуковом потоке достаточно для установления термодинамического равновесия между вращательной и поступательной температур, но мало для изменения колебательной температуры.

В работе представлены и проанализированы данные в сверхзвуковых разреженных потоках азота и аргона с развитой конденсацией. Полученные в ходе экспериментов результаты сопоставлены с литературными зависимостями и численными расчетами.

Работа выполнена в Новосибирском государственном университете на газодинамическом стенде ЛЭМПУС-2 Центра коллективного пользования «Прикладная физика» при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-11-00080).

Список литературы:

1. Ieshkin A. E. et al. // Uspekhi Fizicheskikh Nauk. 2022. V. 192. №. 7. P. 722-753.
2. Khoury J. et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2013. V. 307. P. 630-634.
3. Дулов В.Г., Лукьянов Г.А. Газодинамика процессов истечения. Новосибирск: Наука, 1984, 235 с.
4. Dorchies F. et al. //Physical review A. 2003. V. 68. №. 2. P. 023201.
5. Xu H. et al. //AIP Advances. 2021. V. 11. №. 7.
6. Dubrovin K. A. et al. // Vacuum. 2023. V. 218. P. 112652.
7. Воскобойников Ю. Е. и др. // Прикладная механика и техническая физика. 1976. Т. 17. №. 5. С. 32-41.
8. Бочкарев А.А., Рапапорт П.А., Тимошенко Н.И. // ПМТФ. 1. 30 (1973).
9. Muntz E. P. The electron beam fluorescence technique // AGARD. 1968. P. 112 .
10. Muntz E.P. Static Temperature Measurements in a Flowing Gas // The Physics of Fluids. 1962. V.5. P.80.
11. Орлова З. Т. //Теплофизика высоких температур. 1973. Т. 11. №. 6. С. 1137-1141.
12. Шарафутдинов Р. Г., Баранов Е. А., Хмель С. Я. //Письма в Журнал технической физики. 2011. Т. 37. №. 24. С. 66-73.
13. Сухинин Г. И., Шарафутдинов Р. Г. //ЖТФ. 1982. Т. 53. №. 2. – С. 13.
14. Беликов А. Е. и др //Прикладная механика и техническая физика. 1988. Т. 29. №. 5. С. 33-40.
15. Беликов А. Е. и др. //Прикладная механика и техническая физика. 1987. Т. 28. №. 4. С. 131-138.
16. Куснер Ю. С //Журнал технической физики. 1987. Т. 57. №. 5. С. 849-853.

УДК 621.365.91:533.9

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЕННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ

Аньшаков А.С.[1], Домаров П.В.[1,2]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] Новосибирский государственный технический университет,
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Важное место с точки зрения экологии занимает обезвреживание и уничтожение техногенных образований и отходов. Одним из видов техногенных отходов являются медицинские инфицированные материалы. Уничтожение этого вида отходов актуально всегда. Оптимальной технологией по безопасности, производительности и энергоэффективности является плазменная технология, но её применение ограничено из-за малого времени службы плазмотронов и высоких эксплуатационных затрат. При решении этих проблем плазменная установки по переработке медицинских отходов может быть предложена для утилизации медицинских отходов.

Главным оборудованием в системе электроплазменной установки и технологической цепочке по переработке отходов является плазменная электропечь. В реакционной зоне которой температурный уровень достигается до 1200-1500 °С. Таких температур позволяет достигнуть электродуговой плазмотрон мощностью 20-50 кВт.

В процессе переработки отходов образующийся шлак переплавляется в плавильной камере. В плазменной электропечи также предусмотрен слив шлака по мере наполнения камеры расплавом.

Использование плазменной технологии для переработки отходов позволяет:

- уменьшить объём газа, который необходимо подвергать очистке,
- исключить образование оксидов азота благодаря восстановительной среде в реакторе;
- получить синтез-газ теплотворностью до 10 – 13 МДж/м3, пригодный для последующего его использования в энергогенерирующих устройствах,
- перевести неорганическую часть отходов в жидкий шлак (под действием плазмы с температурой ~4000 К) с последующим остекловыванием для придания ему инертных свойств.

Технология основана на высокотемпературном (1200÷1600 °С) плазменном воздействии и полном разложении высокомолекулярных органических соединений и газификации утилизируемых продуктов с помощью дуговой плазмы до простых химических соединений для получения полезного продукта - синтез-газа, который представляет собой смесь водорода и оксида углерода, а также инертного шлака.

Целью проведения экспериментальных исследований для плазменного обезвреживания и уничтожения медико-биологических отходов является нахождение наилучших технологических парамет-ров: состав отходящих газов, зависимость отходящих газов от температуры в камере плазменной электропечи, удельные энергозатраты в ходе проведения технологического процесса и т.д.

Принципиальная схема экспериментальной плазменно-термической электропечи производительностью до 20 кг/час приведена на рисунке 1, Плазменная электропечь предназначена для отработки технологии высокотемпературной (плазменной) газификации возобновляемых углеродсодержащих отходов различного происхождения (опилки, ветошь, полиэтилен, медико-биологические отходы и др.).

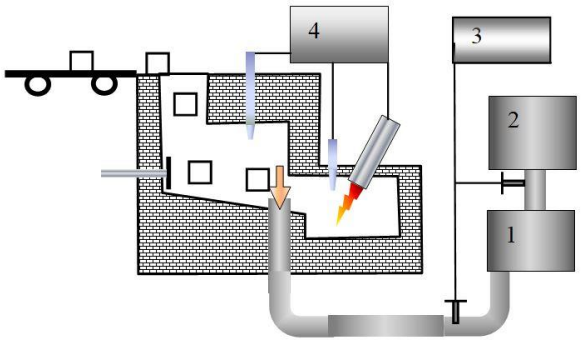


Рис.1 Схема плазменной электропечи

Экспериментальные исследования плазменной переработки медико-биологических отходов проводились в различных температурных режимах. При изменении температуры в реакционной зоне плазменной печи изменялся состав отходящих газов. На основании проведенных математических и экспериментальных исследований процесса переработки медико-биологических отходов удалость выявить наилучший, по экологическим показателям, состав образуемого газа.

«Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН (№ гос. рег. 121031800229-1).»

УДК 533.27, 537.53

ИССЛЕДОВАНИЕ АНОМАЛЬНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧАСТИЦ КЛАСТИРОВАННОГО ПОТОКА СМЕШАННЫХ ГАЗОВ, ИНИЦИИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОНАМИ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ

Дубровин К.А.[1,2], Зарвин А.Е.[1], Мадирбаев В.Ж.[1], Шарафутдинов Р.Г.[2]

[1] Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2
[2] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Согласно классической теории, представленной ещё в середине прошлого столетия [1], при воздействии электронов высокой энергии на частицы газового потока интенсивность излучения, наблюдаемого при энергетическом переходе (i) → (j), можно описать зависимостью:

$$I_{ij} = \frac{k_1 n}{1 + k_2 n \sigma (T) \left(8/\pi\right) RT^{1/2}}, \qquad (1)$$

где I_{ij} – интенсивность наблюдаемого перехода; n – численная плотность частиц; T – температура частиц; R – универсальная газовая постоянная; σ – полное сечение столкновительного гашения верхнего уровня; k_1 – отношение скорости возбуждения, возникающего в результате неупругих столкновений первичных и вторичных электронов с газовой частицей, к полной скорости спонтанного опустошения верхнего уровня; k_2 – обратная величина к общей скорости спонтанного излучения; k_1 и k_2 – константы. При этом, в условиях отсутствия столкновительного гашения флуоресценции (второе слагаемое в знаменателе) зависимость (1) может быть представлена в виде [2-3]:

$$I_{ij} = k_3 \cdot h \cdot c \cdot \nu_{ij} \cdot A_{ij} \cdot n \cdot i_e \cdot Q_i, \qquad (2)$$

где k_3 – приборная константа; h – постоянная Планка; c – скорость света; ν_{ij} – частота излучения; A_{ij} – коэффициент Эйнштейна; i_e – ток пучка электронов; Q_i – полное сечение возбуждения верхнего уровня. Таким образом, в первом приближении можно констатировать, что зависимость интенсивности излучения I_{ij} от численной плотности частиц n линейна. Данный факт был неоднократно подтвержден не только в условиях статичного фонового газа, но и в сверхзвуковых потоках.

В свою очередь, в работе [4] было продемонстрировано, что в сверхзвуковом кластированном потоке смеси аргон-моносилан при активации частиц электронами высокой энергии наблюдается явление аномального роста интенсивности излучения на отдельных линиях атомов аргона. Авторы предположили, что зафиксированный эффект связан с процессом конденсации в струе и обусловлен электронно-индуцированной флуоресценцией содержащихся в кластере атомов аргона. Рост интенсивности излучения при формировании кластеров ранее был также обнаружен в [5] при изучении хемолюминесценции, возникающей при взаимодействии сверхзвуковой струи оксида азота с встречным потоком воздуха.

В настоящей работе выполнен анализ особенностей излучения аргона в смеси с молекулярными и атомарными добавками в конденсирующихся сверхзвуковых струях [6]. Исследована зависимость интенсивности излучения отдельных линий аргона от газодинамических параметров в струе. В определенном диапазоне давлений, различном для разных составов смесей, не только зафиксировано аномально интенсивное излучение на отдельных спектральных линиях аргона (Ar-I) в смесях с метаном и моносиланом, но и выявлена роль кластеров определенного размера и состава. В то же время в спектре ионов аргона (Ar-II) подобный эффект не обнаружен. Установлено, что причиной аномалии является высокоэффективный молекулярно-кластерный механизм селективного возбуждения отдельных уровней атомов аргона, отсутствующий в неконденсирующихся струях, ослабевающий при последующем росте размеров кластеров и исчезающий на стадии образования крупных кластеров. Выполнены предварительные измерения в смеси аргона с малой добавкой диоксида углерода, также продемонстрировавшие аномальное возбуждение уровней аргона. Рассмотрены и обсуждены основные каналы передачи энергии. Предложена эмпирическая модель, удовлетворительно описывающая изменение интенсивности излучения аргона на различных стадиях процесса конденсации в смеси аргона с малой примесью метана, а также высказаны предположения о причинах расхождения между моделью и экспериментом в смеси аргона с моносиланом.

Работа выполнена в Новосибирском государственном университете на газодинамическом стенде ЛЭМПУС-2 Центра коллективного пользования «Прикладная физика» при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-11-00080).

Список литературы:

1. Smith J.A., Driscoll J.F. The electron-beam fluorescence technique for measurements in hypersonic turbulent flows // J. Fluid Mech. – 1975. – V.72, Iss.4. – P.695-719.
2. Ребров А.К., Чекмарев С.Ф., Шарафутдинов Р.Г. Влияние разреженности на структуру свободной струи азота // ПМТФ. – 1971. – N.1. С.136-141.
3. Muntz E.P. The electron beam fluorescence technique // AGARD. – 1968. – 112 p.
4. Sharafutdinov R.G. and Khmel S.Ya. Abnormal optical emissions in a condensing monosilane–argon gas jet activated by electron beam plasma // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2003. V. 23. No. 3. P. 463-488.
5. Golomb D. and Good R.E. Clusters in isentropically expanding nitric oxide and their effect on the chemiluminous NO–O reaction // J. Chem. Phys. 1986. V. 49. P. 4176–4180.
6. Zarvin A. E. et al. On the mechanism of ionic-cluster excitation of argon levels in molecular gas mixtures // Plasma Chemistry and Plasma Processing. – 2022. – V. 42. – №. 1. – P. 247-265.

УДК 533.6.011.8; 001.891.57; 533.17; 544.277.6

ЦИКЛ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССА КОНДЕНСАЦИИ ЧАСТИЦ НА ГАЗОДИНАМИКУ МОДЕЛИРУЕМОГО ПОТОКА

Зарвин А.Е.[1,2], Яскин А.С.[2], Каляда В.В.[2], Художитков В.Э.[1,2], Дубровин К.А.[1,2], Деринг Е.Д.[1,2]

[1] Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1
[2] Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Истечение газов и газовых смесей из единичных сопел и блочных конфигураций в разреженное пространство (вакуум) является предметом многочисленных исследований, обусловленных в первую очередь интересами развития космической техники [1-4]. Испытания отдельных элементов и блоков космических аппаратов в условиях, близких к натурным, в особенности при моделировании процессов в глубоком вакууме или сильно разреженной среде сложного газового состава, требуют чрезвычайно больших материальных затрат. Поэтому представляет интерес моделирование сложных сверхзвуковых течений в вакууме на лабораторных стендах, ограниченных по скорости откачки истекающих газов.

Сложной проблемой для моделирования на лабораторных установках является невозможность соблюдения высокой температуры в форкамере сопла (температуры торможения, T_0) при стационарном или квазистационарном сверхзвуковом течении. Как правило, на лабораторных установках T_0 не превышает 300 - 350 К. При высоких давлениях торможения в таких моделируемых потоках происходит формирование газовых кластеров. Соответственно, влияние конденсации на параметры сверхзвукового течения может привести к существенному искажению газодинамики моделируемых процессов. В этих условиях крайне важным является прямое экспериментальное моделирование истечения сверхзвуковых потоков из одиночных сопел и блочных компоновок, изучение влияния процесса конденсации на газодинамику.

Ранее [5] нами было показано, что в условиях интенсивного кластерообразования могут возрастать продольные и поперечные размеры сверхзвуковых струй, формироваться внешний кластерный поток, проявляться иные аномальные эффекты. Целью настоящего исследования является изучение особенностей формирования бинарных блочных струй в условиях кластерообразования.

В настоящей работе для экспериментальных исследований использован комплекс вакуумных стендов Новосибирского государственного университета [6-7]. Для получения подробной информации использованы режимы с вертикальным и горизонтальным относительно наблюдателя расположением одинаковых сверхзвуковых сопел. Диагностика взаимодействующих струй в отсутствие собственного свечения холодных (T_0 = 300 К) потоков, в условиях разреженной среды (давление фонового газа менее 10 Па) осуществлялась традиционной высоковольтной электронно-пучковой диагностикой [8]. Использовались три метода регистрации. Метод фотофиксации светящихся газовых потоков через оптическое окно с помощью стандартной фотокамеры обеспечивал визуализацию взаимодействующих потоков, при этом регистрировалось излучение (в видимом диапазоне длин волн) при переходах как мономерных (преимущественно с возбужденных короткоживущих уровней), так и кластерных компонентов газового потока (в том числе с долгоживущих состояний).

Двумерное онлайн-сканирование обеспечило получение большого объёма данных при фиксации продольных и поперечных срезов в любой плоскости сечения бинарных струй. Регистрация этим методом осуществлялась непосредственно из области узкого первичного электронного пучка при использовании камеры с линейкой фотодетекторов МАСИ-USB [9]. Соответственно, фиксировалось излучение в основном с малыми временами жизни.

Спектроскопия изучаемых объектов обеспечила измерение плотности на отдельных участках исследуемых струй. Сопоставление результатов, полученных тремя методами, позволило получить уникальную информацию о процессах, происходящих при истечении бинарных струй.

Исследование выполнено в Институте теоретической и прикладной механики СО РАН на оборудовании Центра коллективного пользования «Прикладная физика» Новосибирского государственного университета при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-19-00750).

Список литературы:

1. Газодинамика процессов истечения / В.Г. Дулов, Г.А. Лукьянов: Новосибирск, Наука, 1984. 235 с.
2. Волчков В.В., Иванов А.В., Кисляков Н.И. и др. Струи низкой плотности за звуковым соплом при больших перепадах давления // ПМТФ. 1973. № 2. С. 64-73.
3. Ashkenas H.Z., Sherman F.S. The structure and utilizations of supersonic free Jets in low density wind tunnels // Rarefied Gas Dynamics. Proc. of the 4th RGD Symp. 1966. V. 2. P. 84–105.
4. Ярыгин В.Н., Герасимов Ю.И., Крылов А.Н. и др. Газодинамика космических кораблей и орбитальных станций (обзор) // Теплофиз. и Аэромех. 2011. Т. 18. № 3. С. 345-372.
5. Zarvin A., Dubrovin K., Kalyada V. et al. Modeling supersonic rarefied jets on experimental cluster at Novosibirsk State University // E3S Web of Conf. XXXIX STS. 2023. V. 459. No. 01003.
6. Зарвин А.Е., Каляда В.В., Яскин А.С. и др. Экспериментальная установка для плазмохимических исследований // ПТЭ. 2016. № 6. С. 50-56.
7. Zarvin A.E., Kalyada V.V., Madirbaev V.Zh. et al. Condensable supersonic jet facility for analyses of transient low-temperature gas kinetics and plasma chemistry of hydrocarbons // IEEE Transactions on Plasma Science. 2017. V. 45. Issue 5. P. 819-827.
8. Gochberg A. Electron beam fluorescence methods in hypersonic aerothermodynamics // Prog. Aerosp. Sci. 1997. V. 33. P. 431-480.
9. Ващенко П.В., Лабусов В.А., Шиманский Р.В. Апертурные характеристики линеек фотодетекторов БЛПП-2000 и БЛПП-4000 // Завод. лаб. Диагн. матер. 2022. Т. 88. № 1-2. С. 22-26.

УДК 533.697.4

ЯВЛЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ, КАК СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ ЦЕНТРАЛЬНОГО ТЕЛА МНОГОКАМЕРНОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

КАУН Ю.В.[1], А.В. КОЛЫЧЕВ[1], П.А. АРХИПОВ[1]

[1] Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская улица, дом 1

Введение. При реализации предлагаемого метода организации системы охлаждения достигается технический результат, который заключается в увеличении надежности многокамерной двигательной установки с центральным телом за счет его термоэмиссионного охлаждения.

Данный метод охлаждения можно применять при охлаждении центральных тел двигательных любой формы, в том числе и осесимметричной с кольцевым соплом.

1. Организация термоэмиссионного охлаждения.

Торможение газа в ударном слое, образованном головной ударной волной, сопровождается возникновением области с очень высокой температурой (десятки тысяч градусов), в которых протекают многочисленные физико-химические процессы (возбуждение колебательных степеней свободы молекул, диссоциация, ионизация, излучение и др.).

При заданных режимах обтекания возможно использование эмиссионного охлаждения – эффекта охлаждения, сопровождающий термоэлектронную эмиссию (испускание электронов горячим материалом). Достоверно были получены результаты в 70-80 гг в СССР и США. При КПД 10-25 % от подводимого нагрева, эмиссионное охлаждение непосредственно оболочки (катода) может достигать 50-75 %. [1].

Термоэмиссионное охлаждение может быть реализовано двумя способами. Первый – это закрытая схема, при которой термоэмиссионное охлаждение оболочки летательного аппарата осуществляется во внутреннем объеме - в небольшом зазоре между внешней оболочкой передней кромки (катодом) и внутренней оболочкой (анодом). Второй – это открытая схема, при которой катод и анод расположены снаружи конструкции и термоэмиссионное охлаждение осуществляется с помощью переноса электронов высокоэнтальпийным потоком, обтекающим летательный аппарат.

2. Ближайшие аналоги.

Ближайшим аналогом является многокамерная двигательная установка с центральным телом, которая включает в своем составе коническое центральное тело, с организованной системой охлаждения по регенеративному типу. Центральное тело с системой охлаждения состоит из двух входных труб, которые образуют коллектор из пяти кольцевых охлаждающих каналов. Эти каналы выходят в двадцать отдельных выпускных отверстий, которые затем сходятся в единую центральную трубу вдоль оси главного сопла. [2].

Основным недостатком ближайшего аналога является увеличение требуемой массы хладогента в единицу времени и сложности организации каналов системы охлаждения регенеративным методом. Кроме того, используемая для данного типа сопла система охлаждения приводит к большим гидравлическим потерям энергии топлива (энергия от газогенератора идет на продавливание охладителя в каналах охлаждения).

3. Техническая задача и её решение.

Техническая задача заключается в снижении массы требуемого хладагента в единицу времени за счет термоэмиссионного охлаждения.

Центральное тело находится в тепловом контакте с коллектором. Коллектор выполнен по замкнутой схеме. Коллектор гидравлически последовательно через клапан связан с емкостью для хранения под давлением смеси инертного газа и легкоионизируемой добавки. Коллектор состоит из катодной и анодной стенки, разделенных электроизолирующими элементами. Катодная стенка прилегает к поверхности центрального тела и отделена на расстояние от 0,3 мм до 1 мм от анодной стенки электроизолирующими элементами. Анодная стенка находится в тепловом контакте с тепловым аккумулятором с высокой теплоемкостью. В качестве легкоионизируемой добавки может использоваться калий. В качестве инертного газа в коллекторе может применяться гелий.

Вывод. Применение термоэмиссионного охлаждения позволяет обеспечить снижение перепада температурных напряжений и повышение ресурса центрального тела сопла.

Список литературы:

[1] Ercole, Giacomo & Garofalo, Erik & Lemieux, Patrick & Maglie, Margherita & Pastrone, Dario. (2017). N2O-Cooled Aerospike for a Hybrid Rocket Motor: Nitrous Oxide Characterization and Additive Manufacturing. 10.2514/6.2017-4979.

[2] Podkulski S. P., Wilson V. C. Characteristics of a thermionic converter with a chloride vapor deposited tungsten emitter/110/and a nickel collector. – NASA, 1969. – №. GESP-9001, стр. 19.

[3] Колычев А. В., Керножицкий В. А. Тепловая защита гиперзвуковых летательных аппаратов (ЛА) с использованием явления термоэлектронной эмиссии //Решетневские чтения. – 2009. – Т. 1. – №. 13. – С. 29-30.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № FZWF-2024-0003

УДК 533.17

ТРАВЛЕНИЕ ФТОРПОЛИМЕРНОГО ПОКРЫТИЯ, СИНТЕЗИРОВАННОГО МЕТОДОМ HW CVD, В ПЛАЗМЕ НИЗКОЧАСТОТНОГО ИНДУКЦИОННОГО РАЗРЯДА

Петрова А.В.[1], Пинаев В.А.[1] Хмель С.Я.[1]

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

Перспективным способом интенсификации теплообмена при кипении является использование бифильных поверхностей или поверхностей с неоднородной смачиваемостью. В этом случае на гидрофильной поверхности формируются области из гидрофобного материала. Например, для этого используется фторполимер, осаждаемый методом HW CVD [1]. С помощью применения данного метода были нанесены фторполимерные покрытия на поверхность через маску с отверстиями или щелями [2]. Было проведено методическое исследование и установлены оптимальные условия, необходимые для получения качественных фторполимерных покрытий с высокими скоростями осаждения без маски: расход газа-предшественника окиси гексафторпропилена (C_3F_6O) – 100 sccm, давление P = 0.5 Торр, температура нити 640 °C, напряжение – 23.3 В, ток – 2.8 А, расстояние нить-образец 50 мм. При данных условиях скорость роста покрытия была порядка 7 нм/мин, а толщина покрытия составляла 600 нм при времени синтеза 90 минут. Краевой угол смачивания такой фторполимерной пленки составлял около 134 градусов. Для создания эффективных и стабильных бифильных поверхностей нужно выполнить три условия: хорошее качество покрытия, высокая степень гидрофобности, формирование бифильного рисунка из фторполимерного покрытия с четкими границами. Эти условия легко достигаются при осаждении фторполимерного покрытия через маску с небольшими отверстиями. В частности, так были получены бифильные поверхности в виде массивов фторполимерных пятен диаметром 50 мкм и 100 мкм с шагом 200 мкм и 500 мкм соответственно [2]. Однако при осаждении фторполимера через маску с параллельными щелями 0.5 мм и шагом 1 мм возникла проблема: если бифильный рисунок был четким, то качество покрытия было неудовлетворительным, и наоборот. Если качество пленки было хорошее, то происходило интенсивное «подтекание» под маску с формированием в области геометрической тени фторполимерного покрытия. Поэтому было предложено получать такие поверхности двухстадийным способом. Вначале получать качественные сплошные фторполимерные покрытия методом HW CVD, а затем вытравливать в этом покрытии с помощью плазмы через маску со щелями полосы и формировать контрастные бифильные поверхности. Для травления фторполимера использовалась аргоновая и кислородная плазма низкочастотного индукционного (индуктивно-связанного) разряда с ферромагнитным усилением. Использование разряда данного типа позволяет достигать больших плотностей тока (0.1 – 1 А/см^2) и получать плазму с высокой степенью ионизации и концентрации активных радикалов. Типичные значения концентрации заряженных частиц в плазме низкочастотного индукционного разряда на два-три порядка превышают соответствующие значения, характерные для плазмы тлеющего разряда низкого давления [3]. Параметры индукционного разряда: газовая смесь Ar или O_2, давление 0.1 Торр, плотность тока 0.15 А/см^2, напряжённость электрического поля 0.75 В/см. Скорость травления без маски в аргоновой плазме составляла не менее 10 нм/мин, соответственно пленка толщиной 600 нм полностью удалялась за 60 минут. В кислородной плазме эта скорость была примерно в шесть раз выше. Кроме того, краевой угол смачивания после травления в аргоновой плазме был 61 градус, в то время как в кислородной плазме он незначительно уменьшался, и поверхность оставалась гидрофобной. Таким образом, кислородная плазма низкочастотного индукционного разряда позволяет формировать качественные бифильные поверхности из фторполимерного покрытия за счет травления со скоростями до 60 нм/мин.

Список литературы:

1. Safonov A.I., Sulyaeva V.S., Gatapova E.Y., Starinskiy S.V., Timoshenko N.I., Kabov O.A. Deposition features and wettability behavior of fluoropolymer coatings from hexafluoropropylene oxide activated by NiCr wire// Thin Solid Films. 2018. Vol. 653. P. 165–172.
2. Chinnov E.A., Khmel S.Y., Vladimirov V.Y., Safonov A.I., Semionov V.V., Emelyanenko K.A., Emelyanenko A.M, Boinovich L.B. Boiling heat transfer enhancement on biphilic surfaces// Energies. 2022. Vol. 15. № 19. P. 7296.
3. Исупов М.В., Федосеев А.В., Сухинин Г.И., Уланов И.М. Исследование электрофизических и теплофизических характеристик низкочастотного индукционного разряда трансформаторного типа низкого давления// ТВТ. 2015. Т. 53. № 2. С. 183

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания № 121031800218-5.

УДК 533.17: 541.64

ВЛИЯНИЕ РАЗБАВЛЕНИЯ ГАЗА-ПРЕДШЕСТВЕННИКА ИНЕРТНЫМ ГАЗОМ НА СТРОЕНИЕ ПОКРЫТИЙ ПРИ ОСАЖДЕНИИ МЕТОДОМ HW CVD

Петрова А.В.[1], Сафонов А.И.[1]

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

Метод осаждения тонких фторполимерных покрытий из газовой фазы, активированной горячим проволочным катализатором – Hot Wire Chemical Vapor Deposition (HW CVD) – является одним из перспективных. Это обусловлено простотой применения метода и широкими возможностями управления строением покрытий изменением параметров в процессе осаждения [1, 2]. Основная идея метода HW CVD состоит в том, что разреженный поток газа-предшественника активируется на поверхности активатора, представляющего из себя разогретую до нескольких сотен градусов каталитическую нить. Далее образовавшиеся радикалы и компоненты движутся к поверхности осаждения, где радикалы полимеризуются, формируя фторполимерное покрытие. Контролируя количество радикалов, возможно управлять строением получаемого фторполимерного покрытия, и, соответственно, его свойствами.

Ранее авторами было показано, что при определённых параметрах возможно увеличить количество радикалов при меньшем расходе газа-предшественника [3], однако при этом формируются покрытия с порошкообразным строением и низкой адгезией. В результате была предложена идея разбавлять газ-предшественник инертным газом. При таком подходе снижается количество активных радикалов, достигающих поверхности осаждения, что должно привести к формированию покрытий с определённым строением и свойствами, а также снизить расход более дорогого газа-предшественника.

В работе представлены экспериментальные результаты по разбавлению активированного газа-предшественника инертным газом. Осаждение фторполимерных покрытий на образцы происходило на экспериментальной установке HW CVD, подробно описанной в работе [1]. В качестве газа-предшественника была использована смесь окиси гексафторпропилена (ОГФП, C_3F_6O) с инертным газом (Ar или He) в различных соотношениях. Разбавление ОГФП было произведено в пропорциях (от 0% до 90%).

Полученные фторполимерные покрытия исследовались методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на приборе JEOL JSM-6700F. Была получена информация о морфологии, элементном составе и толщине покрытия. Из полученных данных была определена скорость его роста.

Анализ СЭМ-микрофотографий полученных покрытий показывает существенное изменение в их строении в зависимости от разбавления ОГФП инертным газом. Результаты анализа скорости роста покрытия, представленные на рис.1, показывают, что скорость роста равномерно снижается с увеличением доли инертного газа в смеси (при снижении концентрации ОГФП со 100% до 40%). Однако наблюдается минимум при концентрации ОГФП порядка 40%. Далее наблюдается нетривиальный эффект, выраженный в повышении скорости роста с дальнейшим уменьшением доли ОГФП в смеси с 40% до 10%.

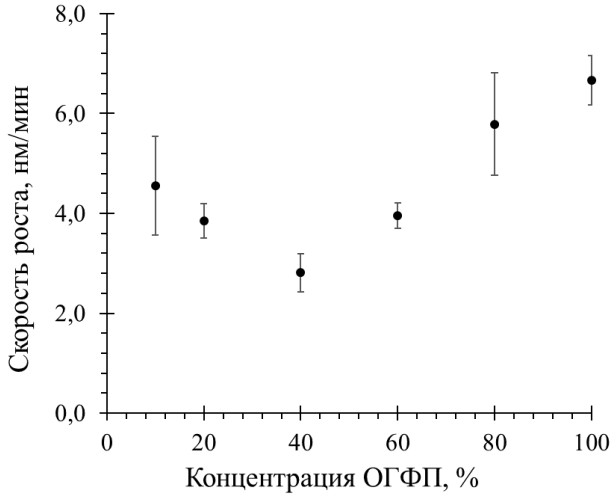


Рис. 1. Скорость роста покрытий для газовых смесей с различными концентрациями ОГФП

В результате проведённого исследования было показано, что предложенный подход разбавления газа-предшественника инертным газом позволяет регулировать количество радикалов, которые достигают поверхности образца, что даёт возможность управлять строением формирующихся фторполимерных покрытий. Исследование показало, что этот параметр существенно влияет на строение покрытия. Впервые обнаружена нетривиальная зависимость скорости роста покрытия от изменения концентрации ОГФП в смеси.

Список литературы:

1. Safonov A.I., Sulyaeva V.S., Gatapova E.Y., Starinskiy S.V., Timoshenko N.I., Kabov O.A. Deposition features and wettability behavior of fluoropolymer coatings from hexafluoropropylene oxide activated by NiCr wire// Thin Solid Films. 2018. Vol. 653. P. 165–172.
2. Safonov A., Sulyaeva V., Timoshenko N., Gatapova E., Kabov O., Kirichenko E., Semenov A. Deposition and investigation of hydrophobic coatings// MATEC Web Conf. 2015. Vol. 37. P. 01047.
3. Сафонов А.И., Суляева В.С., Богословцева А.Л., Тимошенко Н.И. Влияние расхода газа-предшественника на скорость роста фторполимерного покрытия при осаждении методом HWCVD// ПМТФ. 2018. Т. 59. № 5. С. 87–92.

Работа выполнена при поддержке госбюджетного гранта ИТ СО РАН.

УДК 533.9+669.04

ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЕК РАФИНИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

Щукин В.Г., Константинов В.О., Шарафутдинов Р.Г.

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

Мировая совокупная мощность фотоэлектрических систем выросла до 1,6 ТВт в 2023 году по сравнению с 1,2 ТВт в 2022 году, при этом было введено в эксплуатацию от 407,3 ГВт до 446 ГВт новых фотоэлектрических систем [1]. Основным материалом для производства фотоэлектрических систем является кремний. К концу 2023 года глобальные эффективные мощности по производству поликремния достигли примерно 2,25 млн тонн, что на 71,6% больше, чем в прошлом году [2]. Можно сделать вывод, что вопрос увеличения производства поликремния, в том числе новыми экологически безопасными и энергоэффективными методами остается актуальным.

Одним из подходов для очисти металлургического кремния является электронно-пучковое рафинирование в вакууме, при котором удаляются легколетучие примеси [3]. Для извлечения примесей, которые не могут быть извлечены за счет электронно-пучкового переплава используется окислительное рафинирование – перевод примесей в их летучие соединения за счет плазмохимических реакций. В работе 4] показано, что наиболее эффективно окислительный процесс удаления бора происходит в узком диапазоне температур. Также удаление примесей возможно за счет их перераспределения между областями образца за счет перекристаллизации под действием электронного пучка [5].

Для проведения процесса рафинирования в химически активной электронно-пучковой плазме разработан метод [6] с контролируемым изменением температуры рафинирования, включающий в себя три стадии: переплав металлургического кремния в электронном пучке с удалением легколетучих примесей, окислительное плазмохимическое рафинирование с удалением примесей в виде легколетучих оксидов этих примесей, а также перекристаллизация полученного материала с разделением оставшихся примесей за счет сегрегации.

На рисунке 1 приведена схема экспериментальной установки, где 1 – электронная пушка с полым катодом, 2 – блок кольцевых сопел Лаваля, 3 – электронный пучок, 4 – реактор, 5 – сверхзвуковая струя газа, 6 – фокусирующая линза, 7 – водоохлаждаемый коллектор, 8 – металлургический кремний, 9 – секция дифференциальной откачки, 10 – вакуумная камера.

Чистота кремния до и после плазмохимического рафинирования определялась атомно-эмиссионным спектральным методом. В таблице представлены результаты плазмохимического рафинирования.

Показано, что удалось снизить концентрации основных примесей.

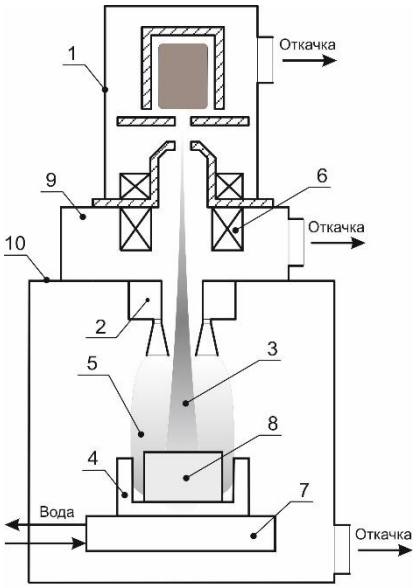


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Таблица

Результаты элементного анализа примесей

Элемент	Исходный, ppm	Рафинированный, ppm
B	41	35
P	30	9.7
Al	260	11
Ca	56	10
Cr	5	1.6
Cu	5	н/о (0.5)
Fe	2000	360
Mn	25	4.1
Ni	38	7.7
Ti	200	38
V	120	22
Zr	90	16

Список литературы:

1. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2024/04/Snapshot-of-Global-PV-Markets_20241.pdf
2. https://www.energytrend.com/news/20240407-46330.html#:~:text=In%20terms%20of%20output%2C%20the,share%20for%20eight%20consecutive%20years
3. Liu T., Dong Z., Zhao Y., Wang J., Chen T., Xie H., Li J., Ni H., Huo D. Large scale purification of metallurgical silicon for solarcell by using electron beam melting // J. Crys. Growth. 2012. Vol. 351. P. 19.
4. Карабанов С.М. и др. Способ очистки металлургического кремния от примесей // Пат. 2693172 РФ. Опубл. 01.07.219. Бюл. №19.
5. Pires J. C. S., Braga A. F. B., Mei P. R. Profile of impurities in polycrystalline silicon samples purified in an electron beam melting furnace // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 2003. Vol. 79. P. 347.
6. Щукин В.Г., Константинов В.О., Шарафутдинов Р.Г. Электронно-пучковое рафинирование металлургического кремния // Прикладная физика. 2019. № 5. С. 65-70.

УДК 54.057

ГАЗОСТРУЙНЫЙ MPCVD СИНТЕЗ АЛМАЗНЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ РАЗНЫХ ДАВЛЕНИЯХ В КАМЕРЕ ОСАЖДЕНИЯ.

Емельянов А.А., Плотников М.Ю., Тимошенко Н.И., Юдин И.Б.

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

Высокие значения твердости и теплопроводности, большое удельное электрическое сопротивление, хорошие диэлектрические свойства, химическая стабильность и прозрачность в широком диапазоне длин волн делают алмаз перспективным для различных механических, термических, оптических и электронных применений [1,2].

Одним из широко используемых методов получения алмазных покрытий является осаждение из активированной в СВЧ разряде смеси газов-предшественников при диффузионной транспортировке фрагментов к подложке (MPCVD). К настоящему времени известно, что процесс синтеза алмаза определяется концентрацией атомарного водорода и продуктов разложения метана у поверхности подложки. Образование данных компонент происходит при возбуждении смеси водорода с метаном в СВЧ разряде и их последующем разложении. Добавление аргона в исходную смесь позволяет рассчитывать на существенное увеличение скорости синтеза алмаза вследствие увеличения температуры в плазменном облаке и соответствующего повышения степени диссоциации водорода [3,4].

В последние годы активно развивается газоструйная модификация [4-7] метода MPCVD, основанная на использовании высокоскоростной струи для доставки к подложке активированных в СВЧ разряде компонент смеси. Детальное исследование структуры алмазов, синтезированных таким способом, приведено в [8,9].

Особенностью газоструйного метода является использование двух камер: разрядной камеры для активации газов-предшественников СВЧ разрядом и камеры осаждения для синтеза алмазных структур на поверхности подложки. В камере осаждения при используемом перепаде давлений между разрядной камерой и камерой осаждения происходит сверхзвуковое расширение активированного газа. Это обеспечивает ряд новых возможностей: активация газа в разрядной камере в широком диапазоне давлений, не зависящих от давления в камере осаждения, и возможность реализации различных режимов осаждения в широком диапазоне удельных массовых потоков компонентов смеси к подложке.

Основной целью проведенной работы была оценка влияния давления в камере осаждения на синтез алмазных покрытий. В «классическом» методе MPCVD активация и осаждение проводятся в одной камере. Поэтому изменение давления всегда приводит к изменению комплекса параметров, связанных с воздействием СВЧ разряда на смесь газов-предшественников. В нашем случае использование двухкамерной системы позволяет проводить эксперименты для разных давлений в камере осаждения при одних условиях в разрядной камере. С другой стороны, давление оказывает существенное влияние на формирование струи, в частности на радиальный разлет компонентов и скорость перемещения частиц к подложке. Это приводит к изменению концентраций отдельных компонент при подлете к подложке. Отдельный интерес представляет формирование сжатого слоя перед подложкой и исследование его влияния на синтез алмазных структур.

Эксперименты проводились для смеси газов предшественников, состоящей из водорода и метана. Сканирующая электронная микроскопия использована для изучения морфологии. Наличие углеродсодержащих фаз определялась с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света. Для получения данных о газодинамике рассматриваемых режимов течения использовались численные расчеты методом прямого статистического моделирования [10].

Полученные результаты важны для дальнейшей оптимизации методики газоструйного осаждения алмазных покрытий с использованием для активации газов-предшественников микроволнового излучения.

Список литературы:

1. Сергейчев К.Ф. Алмазные CVD-покрытия режущих инструментов (обзор)// Успехи прикл. физики. 2015. Т. 3, № 4. С. 342-376.
2. Хмельницкий Р.А. Перспективы выращивания монокристаллического алмаза большого размера // Успехи физ. наук. 2015. Т. 185, № 2. С. 143 – 159.
3. Bolshakov A.P., Ralchenko V.G., Yurov V.Y., et al. High-rate growth of single crystal diamond inmicrowave plasma in CH4/H2 and CH4/H2/Ar gas mixtures in presence of intensive soot formation// Diamond & Related Materials. 2016. V. 62. P. 49–57.
4. Емельянов А.А., Пинаев В.А., Плотников М.Ю. и др. Влияние аргона на газоструйный синтез алмазных покрытий из смеси H_2+CH_4+Ar, активированной в СВЧ-разряде // Теплофизика и аэромеханика, 2023, том 30, № 3, С. 417-426.
5. Ребров А.К., Исупов М.В., Литвинцев А.Ю., Буров В.Ф. Синтез алмазов из микроволновой плазмы с использованием сверхзвуковых потоков газа // Прикладная механика и техническая физика. 2018. Т. 59. № 5 (351). С. 5-12.
6. Rebrov A.K., Bobrov M.S., Emelyanov A.A., et al. Experience in the synthesis of diamond from a supersonic microwave plasma jet// Interfacial Phenomena and Heat Transfer. 2019. V.7(2) P.131–137.
7. Emelyanov A.A., Pinaev V.A., Plotnikov M.Yu., et al. Effect of methane flow rate on gas-jet MPCVD diamond synthesis// J. Phys. D: Appl. Phys. 2022 V. 55(20). 205202.
8. Yelisseyev A.P., Emelyanov A.A., Rebrov A.K., et al. Structure of a diamond deposited from microwave plasma by a new gas-jet method // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2021. V. 94. P.105386.
9. Федосеева Ю.В., Городецкий Д.В., Баскакова К.И. и др. Газофазный синтез легированной азотом алмазной плёнки из высокоскоростного потока микроволновой плазмы// Журнал структурной химии. 2022. Т. 63, № 7. 98811.
10. Bird G.A. Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows. Oxford: Clarendon Press, 1994. P.458.

УДК 532.529

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ПЛЕНКИ БУТАНОЛА СО СПУТНЫМ ПОТОКОМ ГАЗА ВНУТРИ СВЕРХЗВУКОВОГО СОПЛА

Ярыгин В.Н., Приходько В.Г., Ярыгин И.В.

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

Исследование взаимодействия пристенных плёнок жидкости со спутными газовыми потоками является актуальной теплофизической проблемой. Результаты таких исследований являются важными для целого ряда технологических процессов, связанных с охлаждением стенок теплообменников, распылением жидкостей и горением.

В работе представлены результаты экспериментального исследования локальных характеристик пристенных плёнок жидкости при взаимодействии со спутным газовым потоком в сверхзвуковом сопле с геометрическим числом Маха M = 3,75. Эксперименты проводились на вакуумном газодинамическом комплексе ИТ СО РАН в широком диапазоне определяющих параметров, в частности числа Рейнольдса спутного потока. Основная цель работы заключалась в изучении влияния параметров газового потока на структуру и свойства пристенных плёнок жидкости, а также их динамику вдоль стенки сопла при истечении в вакуум. В ходе экспериментов измерены толщина и скорость плёнки жидкости, а также изучены процессы теплообмена и массопереноса на межфазной границе.

В работе использовался бутанол в качестве рабочей жидкости и воздух в качестве рабочего газа. Падение статического давления в газовом потоке внутри сопла с M = 3,75 составляет примерно 2 порядка. При давлении торможения газа в форкамере сопла 100 кПа давление в потоке на срезе будет составлять около 1 кПа. Давление насыщенных паров бутанола при комнатной температуре равно примерно 665 Па, поэтому при давлении торможения газа на уровне 70 кПа и ниже вблизи среза может наблюдаться процесс испарения и кипения пленки жидкости. Выбор бутанола в качестве рабочей жидкости был обусловлен возможностью исследовать течение пленки внутри сопла не только при наличии градиентного газового потока, но и как в условиях кипения и испарения пленки, так и без таковых.

Одна из главных особенностей данной работы состоит в наличии высокоскоростного, до 600 м/с, спутного газового потока, и соответственно высоких чисел Рейнольдса и Вебера. Как показали результаты проведенных экспериментов, в этих условиях спутный газовый поток оказывает сильное динамическое воздействие на пристенную пленку жидкости, приводя к интенсивному волнообразованию, а также срыву и уносу капель с поверхности пленки и их дальнейшему дроблению и ускорению в спутном потоке, что осложняет проведение и анализ результатов пленочных измерений.

В настоящее время существует довольно много методов измерения локальных характеристик пристенных пленок, в частности их толщин. Наиболее часто используются оптические методы, основанные на измерении светопропускания, светопоглощения, либо отражения от поверхности раздела «газ-жидкость». Однако они требуют использования прозрачных стенок канала с хорошими оптическими характеристиками, что часто является весьма проблематичным. В данной работе измерения параметров пристенной пленки жидкости проводились с помощью датчиков емкостного типа, измеряющих величину диэлектрической проницаемости среды над датчиком, из которой в дальнейшем по тарировочным зависимостям можно определить толщину пленки. Для измерения скорости пленки жидкости вдоль образующей сопла размещались 3 датчика на расстоянии 7 мм друг от друга. Сравнивая изменения сигналов во времени от датчиков можно было определись скорость пленки и волн на её поверхности. На рис. 1 приведена зависимость измеренной скорости волн от числа Рейнольдса спутного газового потока.

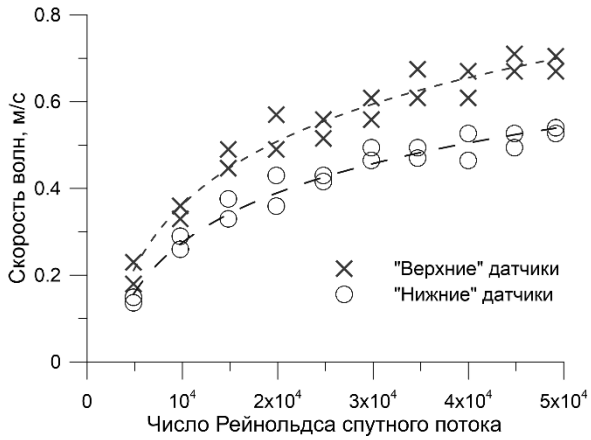


Рис. 1. Скорость волн на поверхности пленки

При течении внутри сопла с одной стороны происходит увеличение скорости спутного газового потока, а с другой стороны падает его плотность, что приводит к уменьшению динамического напора спутного газового потока от критического сечения к срезу сопла. Из рис. 1 видно, что скорости волн на поверхности пленки растут с увеличением числа Рейнольдса спутного газового потока, а при фиксированном значении числа Рейнольдса по мере приближения к срезу сопла пленка замедляется. Хотя скорость от критического сечения до среза сопла с M = 3,75 увеличивается в 1,8 раза и достигает 560 м/с, динамический напор вследствие падения плотности в 18 раз уменьшается примерно в 5,6 раза.

Проведённые эксперименты позволили получить новые данные о влиянии параметров газового потока на характеристики пристенных плёнок жидкости. Эти данные могут быть использованы для разработки и оптимизации различных технологических процессов, связанных с взаимодействием жидкостей и газов.

УДК 533.6.011

ОБОБЩЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЛАЗМОТРОНОВ

Ярыгин В.Н.

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

Теплофизические и газодинамические исследования высокотемпературных, включая плазменные, течений требуют создания соответствующих нагревателей.

Высокие значения КПД, относительная простота конструкции, отсутствие принципиальных ограничений по мощности, диапазону давлений, химическому составу нагреваемой среды способствовали быстрому расширению областей применения плазмотронов, их выходу за пределы лабораторных исследований.

Несмотря на простоту принципиальной схемы электродуговых нагревателей, рабочий процесс в них, определяемый взаимодействием магнитоэлектрических, тепловых и газодинамических явлений, очень сложен. С другой стороны, количество независимых переменных, определяющих рабочий процесс в плазмотроне, близко к числу первичных размерностей. Поскольку именно в этих случаях методы теории подобия и анализа размерностей оказываются наиболее эффективными, то приложение таких методов к анализу условий подобия физических процессов, протекающих в плазмотронах, позволило существенно продвинуться в направлении созданиях общих методов проектирования.

В данной работе отражен вклад академика С.С. Кутателадзе в обоснование и создание инженерных методов расчета электродуговых плазмотронов на основе подходов теории подобия и анализа размерностей. Предложены обобщенные вольт-амперная и тепловая характеристики однокамерного плазмотрона как с обычным водоохлаждаемым, так и с пористым охлаждением анода. Представлен также опыт использования электродуговых плазмотронов в качестве высокотемпературных нагревателей для вакуумных газодинамических установок. Конструктивной особенностью таких плазмотронов является наличие камеры торможения со сверхзвуковым или звуковым соплом.

На рис. 1 представлена одна из схем исследованных плазмотронов, которая использовалась для нагрева Ar, He, N_2, CO_2.

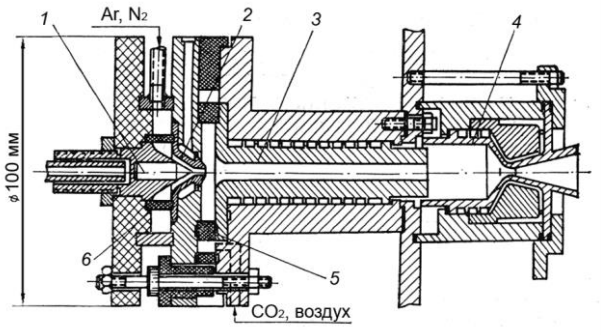


Рис. 1. Схема плазмотрона с защитой катода. 1 – катод, 2 – защитная шайба, 3 – анод, 4 – форкамера сопла, 5,6 – кольца закрутки.

Обобщенная вольт-амперная характеристика в виде:

$$\frac{VL\sigma}{I} = \varphi\left(\frac{I^2}{GL\sigma h}\right)$$

была получена впервые в [1] из анализа размерностей, а тепловая характеристика плазмотрона в виде:

$$\frac{1-\eta}{\eta} = 4\frac{1}{d}\mathrm{St}$$

была получена впервые в [2].

Соответствующие результаты проведенных экспериментов в обобщенном виде приведены на рис. 2. Полученные критериальные зависимости имеют вид:

$$\frac{Vd}{I} = 10^4\left(\frac{I^2}{Gd}\right)^{-0,75}\mathrm{Re}^{-0,5}\left(\frac{1}{1+\tilde{j}_{\text{ст}}}\right)^{-2,6},$$

$$\frac{1-\eta}{\eta} = 2{,}9\mathrm{Re}^{-0,5}\mathrm{Kn}^{-0,15}\tilde{j}_{\text{ст}}{}^{-0,25}$$

в диапазоне Re = (0,35-11)·10^3, Kn = (0,14-14,5)·10^{-4}, $I^2/(Gd)$ = (3-656)·10^2, $\tilde{j}_{\text{ст}}$= 0,014-1,125, d = 0,4-1,6 см.

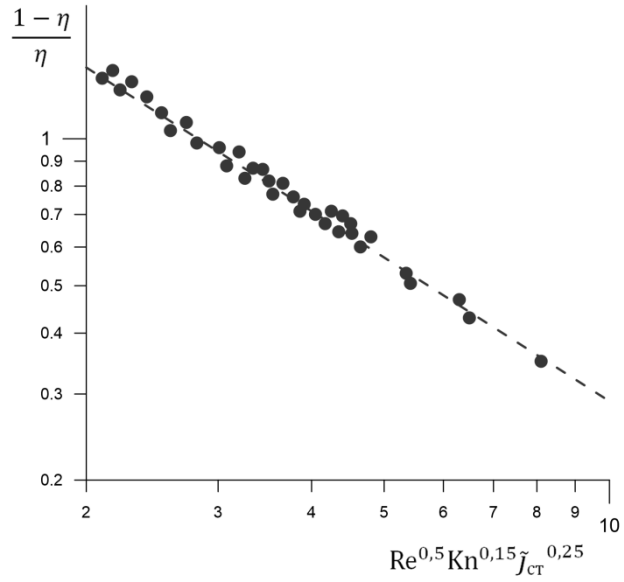


Рис. 2. Тепловая характеристика плазмотрона.

Оснащение созданными электродуговыми подогревателями установок Вакуумного газодинамического комплекса ИТ СО РАН существенно расширили их возможности и позволили выполнить цикл фундаментальных и прикладных исследований сверхзвуковых недорасширенных струй.

Список литературы:

1. Кутателадзе С.С., Яcько О.И. Обобщенные характеристики электродуговых подогревателей // ИФЖ. 1964. Т. 7. № 4. С. 25-28.
2. Кутателадзе С.С., Рубров А.К., Ярыгин В.Н. О влиянии конвективного теплообмена на характеристики плазмотрона // ПМТФ. 1967. №1. С. 157-160.

Секция 7 Теплофизика микро- и наносистем

УДК 539.196.3

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СМАЧИВАЕМОСТИ ТЕКСТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ, ПОКРЫТЫХ ГРАФЕНОМ

Андрющенко В.А. [1,2], **Артишевский К.В.**[1]

[1] Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1
[2] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Процессы, происходящие на микро- и нано-масштабах, привлекают существенное внимание. Данное обстоятельство обусловлено совершенствованием микро- [1, 2] и нано- устройств [3, 4], а также расширением области их применения. При уменьшении размера систем растет вклад поверхностных свойств в их общие свойства. При этом ключевым поверхностным свойством является смачиваемость. В связи с чем, задача управления смачиваемостью поверхностей становится крайне актуальной. Как правило, создание устройств с заданной смачиваемостью производится путем выбора подходящего материала, химической модификации поверхности, а также нанесения на их поверхности различных текстур и/или покрытий. Для усовершенствования процесса создания материалов с заданными лиофильными свойствами, необходимо установление молекулярных механизмов, ответственных за смачивавние различных систем, что можно достигнуть, проводя изучение данных систем на атомарном уровне.

В работе исследуется смачиваемость различных текстурированных поверхностей, покрытых одним или несколькими слоями графена. Изучение указанной системы производится с помощью моделирования методом молекулярной динамики. При этом используется программный пакет LAMMPS (Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator) [5]. Непосредственно изучается растекание капли на различных поверхностях (см., например, рис. 1).

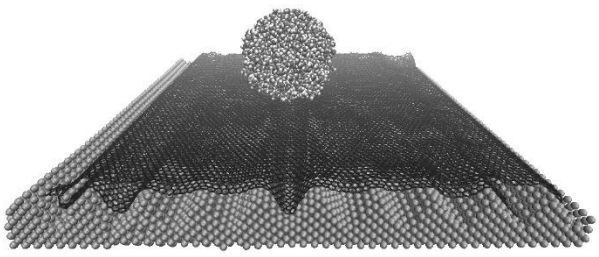


Рис. 1. Характерная иллюстрация растекания водной капли по гидрофильной текстурированной поверхности, покрытой двумя слоями графена.

Все исследуемые поверхности рассматриваются на атомарном уровне. Для задания молекул воды в водной капле используется одна из наиболее надежных моделей – модель TIP4P. Система моделируется в приближении канонического ансамбля. Рассматриваются гидрофильные материалы, покрытые одним или несколькими слоями графена. При моделировании изменяются линейные подложки, глубина, форма и регулярность, создаваемых текстур, а также количество графеновых слоев. Для моделирования графена используется реакционный потенциал AIREBO [6], позволяющий адекватно моделировать деформацию графенового покрытия. При исследовании смачивания вычисляются как геометрические характеристики водной капли (форма, высота, положение контактной линии), так и стационарный контактный угол.

В результате проведения моделирования, было установлено, что изменение смачиваемости существенно зависит от геометрических характеристик наносимых текстур, создаваемых на поверхности материалов. Нанесение графена приводит к увеличению стационарного контактного угла пропорционально количеству наносимых слоев. В предельном случае достигается значение краевого угла, характерного для графита. Изменение смачиваемости также существенно зависит от степени прилегания графена к поверхности материала. Полученные результаты иллюстрируют возможность управления смачиваемостью материалов, путем создания на них текстур с определенными геометрическими характеристиками и нанесения на их поверхность графеновых покрытий.

Список литературы:

1. Azizipour N. et al. Evolution of biochip technology: A review from lab-on-a-chip to organ-on-a-chip //Micromachines. 2020. Т. 11. №. 6. С. 599.
2. Tolabi H. et al. Progress of microfluidic hydrogel-based scaffolds and organ-on-chips for the cartilage tissue engineering //Advanced Materials. 2023. Т. 35. №. 26. С. 2208852.
3. Shafiq M. et al. An overview of the applications of nanomaterials and nanodevices in the food industry //Foods. 2020. Т. 9. №. 2. С. 148.
4. Maiti U. N. et al. 25th anniversary article: chemically modified/doped carbon nanotubes & graphene for optimized nanostructures & nanodevices //Advanced Materials. 2014. Т. 26. №. 1. С. 40-67.
5. Thompson A. P. et al. LAMMPS-a flexible simulation tool for particle-based materials modeling at the atomic, meso, and continuum scales //Computer Physics Communications. 2022. Т. 271. С. 108171.
6. Brenner D. W. et al. A second-generation reactive empirical bond order (REBO) potential energy expression for hydrocarbons //Journal of Physics: Condensed Matter. 2002. Т. 14. №. 4. С. 783-802.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-29-00260).

УДК 621.384.63, 539.1

ВЛИЯНИЕ РАСХОДА ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ НА ТЕМПЕРАТУРУ ТЕПЛОВОГО ФИЛЬТРА 1-Й СТУПЕНИ СИНХРОТРОНА «СКИФ»

Винокуров В.А[1], Винокуров В.В[1,2], Кабов О.А[1], Пуховой М.В.[1,2]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] «Федеральный исследовательский центр «Институт катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук» (ЦКП «СКИФ»)

Синхротрон является одним из типов резонансных циклических ускорителей. Его отличительной особенностью является то, что в процессе ускорения частиц орбита пучка остаётся постоянного радиуса, а ведущее магнитное поле поворотных магнитов, определяющее этот радиус, возрастает во времени. Сибирский кольцевой источник фотонов (СКИФ) — строящийся в Сибири в наукограде Кольцово (Новосибирская область, Россия) источник синхротронного излучения поколения «4+» с энергией 3 ГэВ и эмиттансом 75 пм·рад. Завершение строительства намечено в 2024 году. Первым теплонагруженным элементом будет являться коллиматор, формирующий геометрические размеры пучка СИ на последующие элементы канала и рассеивающий мощность 20.28 кВт.

Важным этапом экспериментов и численного моделирования являются расчеты тепловых фильтров, имеющих в своем составе пластины CVD-алмаза. Выбор оптимального способа охлаждения теплового фильтра – важнейшая задача, которую можно выполнить с помощью численного 3D-моделирования.

Один из вариантов теплового фильтра 1-й ступени синхротрона «Скиф» состоит из алмазного стекла диаметром 40 мм. Между алмазной пластиной Ø40x0.3 мм и медными фланцами Ø60x10 мм с окнами 35x8 мм находится прослойка галлия толщиной 0.5 мм. Водяное охлаждение осуществляется с помощью миниканалов размером 0.5x1 мм, расположенных внутри медных фланцев. Общее поглощение тепла в алмазной пластине составляет 1290 Вт. Распределение теплового потока задается из экспериментальных данных.

Численные 3D-расчёты тепловых нагрузок и системы охлаждения выполнялись с помощью пакета программ Ansys Fluent. Расчетная сетка состоит из 3.48 млн элементов, со сгущением в области каналов, а также со сгущением в области пучка синхротронного излучения. Для решения использовалась нестационарная k-omega модель турбулентности. В численных расчетах учитывались зависимости свойств алмазной пластины от температуры (теплопроводность и теплоемкость C_P). Были определены распределения температуры по поверхности алмазного стекла (Рис. 1), а также зависимости максимальной температуры в алмазном стекле от расхода охладителя в системе. Построены аналитические аппроксимации (Рис.2).

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ЦПК «СКИФ» ИК СО РАН (FWUR-2024-0040) и Института Теплофизики им. Кутателадзе СО РАН (проект 121031800213-0)

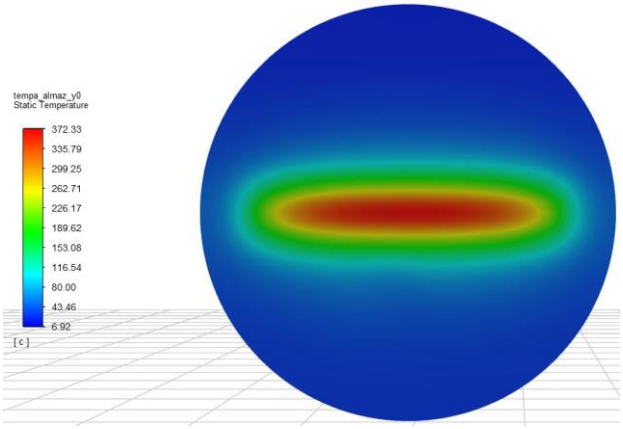


Рис. 1. Распределение температуры по поверхности алмазного стекла в сечении x=0, y=0 мм. Толщина алмазного стекла: 0.3 мм, расход воды: 1.047л/мин.

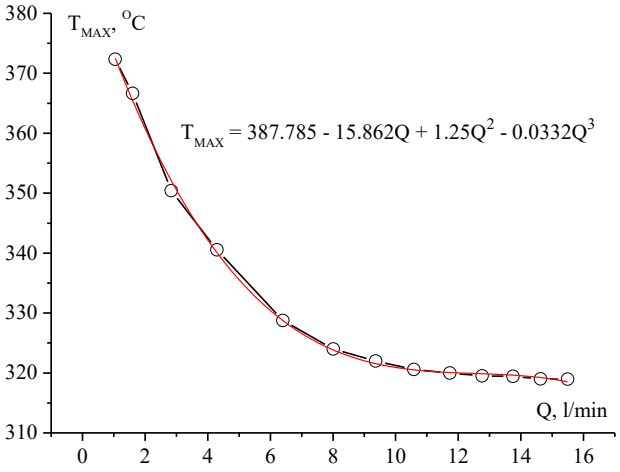


Рис. 2. Зависимость максимальной температуры в алмазе расхода охлаждающей жидкости.

Список литературы:

1. Schildkampand W., Nikitina L. Manufacturing of diamond windows for synchrotron radiation // REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS. 2012. V. 83, 095104. DOI: 10.1063/1.4748265
2. Benmerrouche M., Sunil C. High Energy Engineeering X-ray Scattering (HEX) // Conference paper. 2018. Conference: SATIF-14At: Gyeonju.
3. Pukhovoy M.V., Vinokurov V.V, Vinokurov V.A., Kabov O.A. Numerical simulation of the diamond window of the synchrotron workstation. Choice of diamond foil thickness (0.2-1.0 mm) // E3S Web of Conferences 2023. V. 459, N. 08010. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345908010
4. Pukhovoy M.V., Zolotarev K.V., Vinokuro V.V., Vinokurov V.A., Finnikov K.A., Bykovskaya E.F., Kabov O.A. Calculation of cooling systems for CVD–diamond filters of the Siberian Ring Photon Source // Interfacial Phenomena and Heat Transfer. 2023. V. 11. N. 2 P. 81–93. DOI: 10.1615/interfacphenomheattransfer.2023047183

УДК 621.9

ВЛИЯНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ В МИКРОКАНАЛАХ

Глуздов Д.С.[1,2], Гатапова Е.Я.[1,2]

[1]Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова 2
[2]Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Микрофлюидика это быстро развивающаяся мультидисциплинарная область на стыке физики, техники, химии и биологии. В последние годы эта дисциплина пережила значительный рост, обусловленный потенциалом микрофлюидных устройств и развитием аддитивных технологий и материаловедения [1].

Множество работ посвящено увеличению эффективности микрофлюидных систем, в частности через манипулирование граничными условиями [2-6]. В данной работе мы использовали ранее разработанный валидированный подход [7] для расчетов микроканалов с различными граничными условиями. В данной работе мы добавили в расчеты учет граничного условия Навье, реализованного в неявном виде и провели серию расчетов для микроканала с разными длинами проскальзывания и сложной структурой на границе (рисунок 1), с целью поиска оптимальных параметров граничных условий.

Численные расчеты были сверены с экспериментальными данными и аналитическими расчетами, при возможности, по формуле зависимости перепада давления ΔP от расхода жидкости Q в микроканале прямоугольного сечения при разной длине проскальзывания [8]:

$$\Delta P = \frac{12\mu QL}{1+\frac{6\beta}{H}-\frac{192H}{\pi^5 W}\left(1+\frac{\pi^2\beta}{2H}\right)\tanh\left(\frac{\pi W}{2H}\right)}\frac{1}{WH^3}$$

где H – высота микроканала, W – ширина, β – длина проскальзывания, μ – динамическая вязкость.

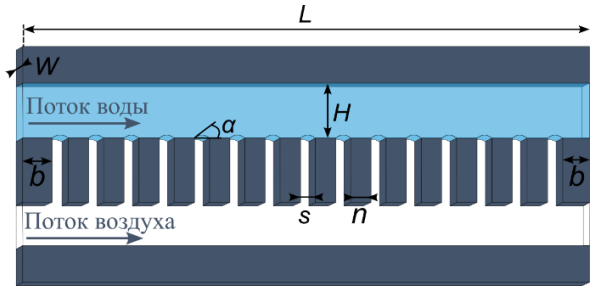


Рисунок 1: Микроканал с контролируемым пузырьковым матрасом, впервые представленный в работах Karatay E. и Haase A. [9]

На рисунке 2 представлен один из результатов расчетов в микроканале со структурированными поверхностями, показывающий, что для микроструктуры границ с пузырьками наиболее оптимальными параметрами являются: квадратное сечение микроканала и отсутствие выступа пузырьков ($\alpha = 0°$). Параметры микроканала: высота 50 мкм, длина 800 мкм, начальная скорость воды 0,2 м/с, ширина пузырьков s=20 мкм.

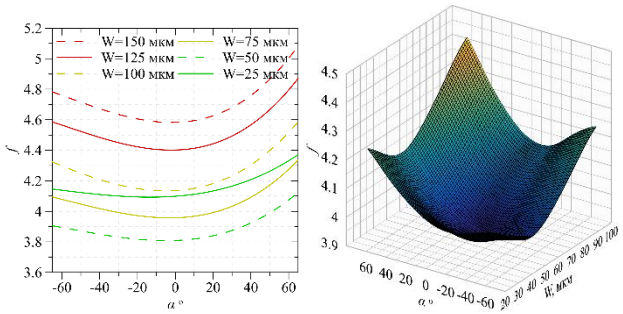


Рисунок 2: Зависимость коэффициента сопротивления f в микроканале от угла выступа пузырьков $\alpha°$ и от ширины микроканала W. Справа представлена трехмерная поверхность для иллюстрации минимума коэффициента сопротивления.

Результаты расчетов также демонстрируют, что эффективность граничных условий растет при уменьшении размеров микроканала. В микроканале с гидрофобной структурой на одной границе возможно достичь уменьшения коэффициента сопротивления на 40%, а в микроканале с гидрофобной структурой на двух противоположных границах возможно достичь уменьшения коэффициента сопротивления на 60%.

Список литературы:

1. Convery N. and Gadegaard N. 30 years of microfluidics // Micro and Nano Engineering. 2019. № 2. С. 76-91.
2. Ou J., Perot B. and Rothstein J. P. Laminar drag reduction in microchannels using ultrahydrophobic surfaces // Phys. Fluids. 2004. Т. 16. С. 4635–4643.
3. Rothstein J. P. Slip on superhydrophobic surfaces // Annu. Rev. Fluid Mech. 2010. Т. 42, С. 89–109.
4. Raayai-Ardakani S. and McKinley G. H. Geometric optimization of riblettextured surfaces for drag reduction in laminar boundary layer flows // Phys. Fluids. 2019. Т. 31.
5. Hossain M. Z. and Floryan J. M. On the role of surface grooves in the reduction of pressure losses in heated channels // Phys. Fluids. 2020. Т. 32.
6. Gluzdov D.S. and Gatapova E.Y. Microchannel surface structures for drag reduction // Journal of Engineering Thermophysics. 2023. Т. 32. №. 2. С. 214–241.
7. Gluzdov D.S. and Gatapova E.Y. Friction reduction by inlet temperature variation in microchannel flow // Physics of Fluids. 2023. Т. 33. №. 6.
8. Watanabe K., Mizunuma H. et al. Slip of netwonian fluids at slid boundary // JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering. 1998. Т. 41. С. 525–529.
9. Karatay E., Haase A., Visser C., et al. Control of slippage with tunable bubble mattresses // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2013. Т. 110. № 21. С. 8422–8426

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-19- 00722-П, https://rscf.ru/project/20-19-00722/.

УДК 532, 533

ГЕНЕРАТОР МИКРОКАПЕЛЬ

Кабов О.А., Марчук И.В., Гришков В.А., Деревянников И.А., Сибиряков Н.Е., Кочкин Д.Ю., Быковская Е.Ф.

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

Левитирующие микрокапли представляют собой передовую и быстроразвивающуюся область физики жидкости. Явление левитирующих микрокапель изучалось с помощью различных механизмов, включая создание самоорганизующихся кластеров и применение определенных физических условий для достижения долговременной левитации. В частности, из-за того, что отдельные микрокапли могут как притягиваться, так и отталкиваться друг от друга, в большом количестве они собираются в различные типы кластеров (гексагональный, цепной, иерархический, кольцевой, малые кластеры), в зависимости от условий их получения и параметров внешней среды.

Создание непрерывного контролируемого потока микрокапель представляет особый интерес в области микробиологии и биохимии, а также нанофлюидики. Классические методы нано-дозирования жидкости сильно ограничены либо доминирующим поверхностным натяжением, либо необходимостью создавать большой набор капель разного размера и аккуратно выбирать необходимые электрическим полем, или газовым потоком. Кроме того, создавая микрокапли с заданными теплофизическими свойствами и наблюдая за их движением и оседанием на поверхностях, можно изучать поведение вирусов и микроорганизмов, распространяющихся воздушно-капельным путём. Эти знания могут привести к разработке инновационных инструментов для исследования микробных сообществ и улучшения нашего понимания экологических и биологических систем.

С этой целью мы создали экспериментальную установку, способную генерировать непрерывный поток микрокапель. Подробнее конструкция и принцип работы установки описаны в патенте № 2824439.

Для исследования процесса генерации микрокапель над поверхностью нагреваемой воды и формирования из них потока, падающего через отверстие в центре испарителя, был изготовлен стенд, структурная схема его рабочей части представлена на рисунке 1. Цифрами на рисунке обозначены: 1 - теплопроводящая подложка, 2 - слой жидкости, 3 - квадратный канал для микрокапель, 4 - ограничивающие стенки, 5 - дозатор жидкости, 6 - нагревательный элемент, 7 - тепло- и электроизоляция, 8 - острая кромка, 9 - линия контакта газ-жидкость-твердое тело, 10 - монослой левитирующих микрокапель, 11 - отскакивающие микрокапли, 12 - сверхинтенсивное испарение в области линии контакта, 13 - мениск жидкости, 14 - вертикальный поток микрокапель жидкости, 15 - охладитель воды, 16 - труба подачи охлаждающей воды, 17 - конвективный нисходящий поток воздуха. Для доступа к нижней части генератора микрокапель он приподнят над позиционирующим устройством на трех ножках. В средах 7, 6 и 1 вставлены три термопары, еще одна термопара (T4) помещена в средний зазор, между 3 и 14.

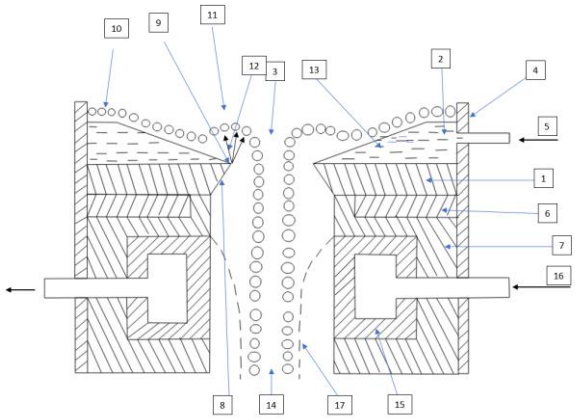


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

В ходе проведения экспериментов мы обнаружили, что установка генерирует не постоянный поток микрокапель, а пульсирует и время от времени выбрасывает часть капель наверх. Это связано с перепадом температуры в центральном отверстии. Когда воздух начинает двигаться вниз, в отверстие вместе к каплям попадает горячий водяной пар, который конденсируется и нагревает стенки. Этот нагрев уменьшает теплопередачу от холодильника и нагревает находящийся внутри воздух. В результате, у воздуха появляется положительная плавучесть и он начинает замедляться, а затем поднимается, как по дымоходной трубе. Затем снизу в отверстие снова попадает внешний воздух с меньшей температурой и влажностью, теплопередача от холодильника растёт, воздух в цилиндре охлаждается и начинает стремиться вниз. Как следствие, возникают автоколебания столба воздуха с низкой частотой.

Экспериментальный образец стабильно выдаёт периодический поток капель, причём перерыв в подаче капель длится около 1/6 периода. Такие колебания позволяют получить более однородный поток капель, благодаря выбрасыванию вверх относительно мелких, поскольку они проще всего увлекаются восходящим потоком.

Работа выполнена по проекту РНФ № 23-29-00919.

УДК 532.13, 536.2, 538.9

СТОХАСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА В ЖИДКОСТЯХ

Лежнев Е.В.[1,2], Рудяк В.Я.[2]

[1] Новосибирский государственный технический университет,
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20
[2] Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин),
630008, Россия, Новосибирск, ул. Ленинградская, 113

Для описания и моделирования течений жидкостей используются методы механики сплошных сред, в частности, уравнения Навье–Стокса. Использование этих уравнений требует знания коэффициентов переноса: диффузии, вязкости, теплопроводности и т.д. Эти коэффициенты в общем случае зависят от температуры, плотности, давления. Вычисление коэффициентов переноса в газах – довольно сложная процедура, поэтому обычно коэффициенты переноса определяются экспериментально. В жидкостях же единственным способом для получения этой информации является эксперимент и различные экспериментальные или полуфеноменологические корреляции. Однако экспериментальное определение коэффициентов требует больших ресурсов и инструментария, кроме того, невозможно измерить при всех возможных комбинациях материалов и условий. А в ряде случаях это сделать невозможно, например, в наноканалах.

Методами неравновесной статистической механики были получены формулы для коэффициентов переноса. Они применимы для любой системы частиц, включая простые и дисперсные жидкости. Однако для использования этих формул требуется умение рассчитывать эволюцию этих частиц. Для жидкостей это сделать не удается, поскольку требуется решать аналитически задачу взаимодействия многих частиц.

Для этого используются те или иные методы молекулярного моделирования. Фактически единственным для этой цели является метод молекулярной динамики, возникший более пятидесяти лет тому назад. Он с успехом применятся для решения различных задач механики, физики, химии и биологии. Однако известным его недостатком является большая ресурсоемкость. Кроме того, точных траекторий этот метод не дает, что приводит к необходимости усреднять по достаточно большому количеству траекторий для получения коэффициентов переноса. Поэтому важно создание метода, который бы, с одной стороны, сохранил основное достоинство метода молекулярной динамики – расчет свойств переноса, исходя из обработки фазовых переменных рассматриваемой системы (координат и скоростей всех ее частиц), а с другой, был бы значительно более экономичным и эффективным.

Создание метода стохастического моделирования коэффициентов переноса жидкостей является целью данной работы.

В данной работе предлагается метод СММ моделирования коэффициентов переноса в газах, описанного в [1] распространить и для жидкостей. Метод СММ оказался простым в реализации, что позволило моделировать процессы переноса как в свободной среде, так и в стесненных условиях. К тому же он позволил с точностью эксперимента моделировать коэффициенты переноса как для одноатомных, так и для многоатомных газов. Затем он был обобщен для моделирования коэффициентов переноса в стесненных условиях, и с его помощью впервые была систематически изучена их анизотропия [2].

Однако, он применим для газов, в которых производятся лишь парные соударения. В жидкостях, в отличие от разреженных газов, молекулы всегда находятся во взаимодействии друг с другом. Однако, такое множество взаимодействий наталкивает на идею, что распределение сил на каждую молекулу будет иметь определенный вид. В таком случае мы будем моделировать силы, действующие на молекулы согласно полученному распределению. Нами было показано, что функция распределения сил, действующих на молекулу флюида, имеет определенный вид. Используя это, мы можем моделировать силы, действующие на молекулу, а не взаимодействие молекул. Далее, вычислять эволюцию скоростей и координат молекул в последовательные моменты времени. Это позволит получить данные для вычисления коэффициентов переноса, используя флуктуационно-диссипационную теорему.

Работоспособность предлагаемого метода, который и в дальнейшем также будет называться методом СММ, проверяется на расчете коэффициентов переноса нескольких жидкостей: аргона, ксенона, бензола. Были смоделированы эти жидкости методами СММ и молекулярной динамики и вычислены коэффициенты переноса: вязкость и теплопроводность. В результате коэффициенты переноса как методом молекулярной динамики, так и методом СММ для жидкости были смоделированы с практически экспериментальной точностью. Кроме того, было показано, что метод СММ работает существенно быстрее, чем метод молекулярной динамики.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 20-01-00043).

Список литературы:

1. Ruydak V.Ya., Lezhnev E.V. Stochastic molecular modeling the transport coefficients of rarefied gas and gas nanosuspensions // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics. 2020. V. 11, № 3. P. 285-293.
2. Ruydak V.Ya., Lezhnev E.V. Modeling the rarefied gas thermal conductivity in nanochannels // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics. 2023. V. 14, № 2. P. 186-294.

УДК 548.562

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ ЛАУРИЛСУЛЬФАТА НАТРИЯ В ВОДНОМ РАСТВОРЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ВЗРЫВНОМ ВСКИПАНИИ СЖИЖЕННОГО ФРЕОНА R32

Марасанов Н.В., Климов Б.А.

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

Газовыми гидратами называют особые структуры решетчатого типа, имеющие в своей основе решетку-«хозяина», внутри которой заключены гостевые молекулы гидратообразующего газа. Термодинамические условия формирования таких структур уникальны для каждого гидратообразующего газа, и, при нарушении этих условий, газовый гидрат разлагается на воду и газ с поглощением тепла. Газовые гидраты способны заключать в себе значительные объемы газа, что делает их потенциальное применение очень привлекательным для различных отраслей экономики и промышленности. В частности, они могут быть применены в процессах транспортировки и хранения природного газа, очистке и сепарации газов, опреснении морской воды и пр. Однако, для коммерчески успешного применения этих технологий требуется создание эффективных способов синтеза газогидратов.

Существующие на сегодняшний день методы получения газовых гидратов, основанные на технологиях мелкодисперсного распыления насыщенной газом-гидратообразователем воды, интенсивном перемешивании воды в камере реактора, воздействии на жидкость вибрацией различной частоты, имеют очень низкую производительность. В представленной работе применен новый метод, основанный на процессе вскипания сжиженного газа в объеме воды. Такой подход обеспечивает интенсивный рост массы гидрата за малое время. Процесса образования гидрата инициализируется декомпрессией рабочего участка установки, при которой начинается интенсивное кипение и перемешивание водяного раствора, обеспечивающее развитие межфазной поверхности и формированию гидратных оболочек на поверхности пузырьков газа, которые имеют свойство отслаиваться и не препятствуют дальнейшему контакту газа с водой. Высокая производительность данного метода обусловлен вовлечением в процессе гидратообразования всего объема воды.

Новизной представленной работы является применение метода гидратообразования взрывным вскипанием с добавлением кинетического промотора лаурилсульфат натрия (SDS). Данный промотор ускоряет рост газового гидрата, что можно объяснить повышением растворимости гидратообразующего газа и снижении поверхностного натяжения, в результате чего площадь контакта воды и газа растет в виде пористой поверхности.

Представленная работа является частью обширного исследования метода получения газовых гидратов, основанного на процессе кипения сжиженного гидратообразующего газа в объеме воды, вызванного снижением давления при декомпрессии рабочего участка.

В качестве гидратообразующего газа выступал фреон R32. Экспериментальная установка представляет собой сосуд типа автоклав, спроектированный под высокие давления, из нержавеющей стали. Рабочая область имеет диаметр 0,1 м и высоту 0,3 м. Охлаждение рабочего участка проводилось путем циркуляции антифриза через внешнюю рубашку охлаждения сосуда. За поддержание температуры отвечал криостат Термэкс КРИО-ВТ-06, контроль температуры осуществлялся термопарой типа Pt100, датчиком давления выступал ОВЕН ПД-100. Сброс давления был контролируемым и осуществлялся с расходом 100 л/мин.

Методика проведения эксперимента была следующая: в рабочий объем автоклава помещался раствор массой 200 г с концентрацией лаурилсульфата натрия (SDS) от 0 до 500 ppm. Установка герметично закрывалась. Далее происходило охлаждение раствора. При достижении температуры раствора 8°C производилась закачка в рабочий объем гидратообразующего газа – фреона R32 массой 200 г. В момент достижения раствором температуры 6°C осуществлялась декомпрессия рабочего участка до давления 0,1 МПа, что вызывало одновременное вскипание сжиженного газа и отвод тепла, в следствие чего начинался рост газового гидрата. Определение конверсии газа в газогидратное состояние осуществлялось при полном разложении гидрата путем его нагрева. После прекращения процесса роста гидрата криостат переводился в режим нагрева, повышая температуру рабочего участка, выводя его из зоны термобарической стабильности гидрата, приводя к его диссоциации, сопровождающейся выделением газа. Высвобожденный газ создавал дополнительное давление в рабочем участке, по которому определялась масса высвобожденного газа и его доля относительно изначально закачанной массы газа, а также доля перешедшей в гидратное состояние вода.

В представленном исследовании были определены коэффициенты конверсии газа и воды в газогидратное состояние для растворов с концентрацией SDS 0, 100, 300, 500 и 1000 ppm. Показано, что оптимальная концентрация SDS составляла 500 ppm, а дальнейшее её повышение приводило к ингибированию процесса, которое связано с пенообразованием и появлению мицелл.

Благодарность.

Работа выполнена по госконтракту с ИТ СО РАН (№ 121031800216-1).

УДК 548.562

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАССЫ ВОДЫ НА ПРОЦЕСС ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ МЕТОДОМ ВЗРЫВНОГО ВСКИПАНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ФРЕОНА 32

Марасанов Н.В., Князьков В.А.

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

В течение длительного времени специалисты со всего мира проявляют интерес к газовым гидратам. Исходные исследования фокусировались на предотвращении образования гидратов в газопроводах при добыче газа в северных регионах, что могло привести к их закупоривание и, как следствие, к затратам на аварийные работы. Около 80% природного газа находится в виде газогидратов в зонах вечной мерзлоты и на дне океанического шельфа. Различные страны разрабатывают национальные программы для поиска и разработки таких месторождений. Исследования по искусственным (техногенным) газовым гидратам обладают значительным потенциалом в различных отраслях промышленности, включая транспортировку газа, очистку воды, хранение холода, разделение газов и т.п. Процесс получения газового гидрата сложен и требует значительных энергозатрат. Текущие методы, включая мелкодисперсное распыление струи жидкости в газовой среде и интенсивное перемешивание, не обеспечивают достаточно высокой скорости образования газовых гидратов. Разработанный коллективом авторов метод основан на кипении сжиженного газа в воде при контролируемом сбросе давления. Это приводит к увеличению поверхности контакта между газом и водой за счет интенсивного кипения, отвода тепла и избытка газа, что ускоряет процесс образования гидрата.

В рамках комплексного исследования данная работа описывает метод формирования газовых гидратов. Его основа - процесс кипения сжиженного гидратообразующего газа в воде, возникающий при снижении давления в рабочей зоне. В экспериментах использовался фреон 32 в качестве гидратообразующего газа.

Экспериментальная установка представляет собой спроектированный под высокие давления резервуар из нержавеющей стали (автоклав) с герметичной крышкой с зажимным фланцем и рубашкой охлаждения. Наряду с этим автоклав оснащен мешалкой, заведенной через крышку с помощью магнитной муфты. Рабочая область установки имеет высоту 300 мм и диаметр 100 мм. Температурный режим контролируется циркуляцией теплоносителя через рубашку охлаждения с использованием криостата КРИО-ВТ-06 производства ООО «ТЕРМЭКС». Давление и температура измерялись с помощью датчиков ОВЕН ПД-100 и Pt100 соответственно.

В основе исследования лежала серия экспериментов, в которой в экспериментальную установку помещали дистиллированную воду массой от 50 до 1000 г. После закрытия крышки установки происходило охлаждение раствора до 8 °C. Затем осуществлялась закачка 200 г фреона 32 в рабочую область установки. При достижении водой температуры 6 °C производился сброс давления из установки до 0,1 МПа при одновременном перемешивании с частотой 700 об/мин. Декомпрессия рабочего участка приводила к вскипанию сжиженного фреона в объеме воды при одновременном отводе тепла, в результате чего начинался рост газового гидрата. По окончании процесса гидратообразования весь объем установки прогревался для разложения гидрата и определения массы высвобожденного газа.

В рамках данного исследования были определены коэффициенты конверсии гидратообразующего газа и воды относительно их начальной массы при массе воды 50, 100, 150, 200, 500 и 1000 г (Рис. 1). Отчетливо видно, что в случае массы воды 100 г коэффициент конверсии воды K_w максимален и достигает 97,5 %. Конверсия газа, в свою очередь, максимальна в случае m_w = 500 г и достигает K_g = 11,3 %.

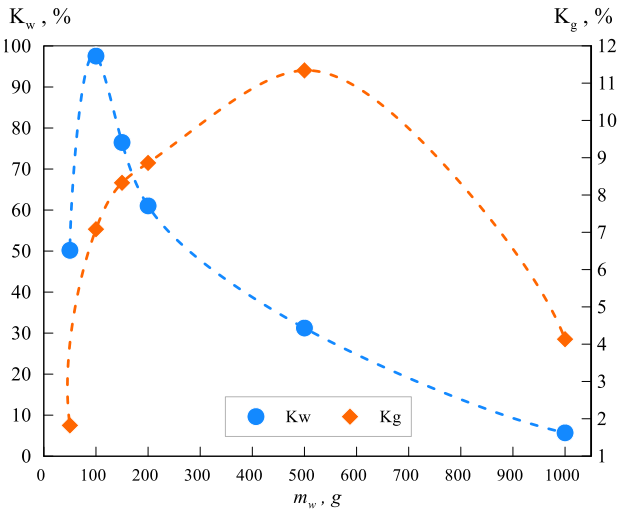


Рис. 1. Коэффициенты конверсии газа (Kg) и воды (Kw) в газовый гидрат относительно начальной массы при различной массе воды.

Благодарность.

Работа выполнена по госконтракту с ИТ СО РАН (№ 121031800216-1).

УДК 548.562

ГАЗОГИДРАТНЫЙ СПОСОБ ОПРЕСНЕНИЯ ВОДЫ

Мелешкин А.В., Климов Б.А.

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

За последние несколько десятилетий морская вода стала важным источником пресной воды, поскольку она является одним из самых богатых ресурсов на Земле. Обратный осмос является наиболее широко используемой технологией опреснения воды в мире, он требует больших затрат энергии (30% от общей стоимости опреснения воды). Следовательно, в мире существует необходимость в разработке инновационных энергоэффективных технологий для опреснения и очистки воды. Опреснение на основе газовых гидратов является многообещающей технологией для этих целей, так как в процессе гидратообразования участвует только чистая вода, что приводит к образованию твердого гидрата и концентрированного соляного рассола. Газовые гидраты – это супрамолекулярное соединение воды и газа, где молекулы воды формируют трехмерную полость, в объеме которой запирается молекула гидратообразующего газа и удерживается там силой Ван-дер-Ваальса. Газогидратный метод опреснения воды ближе всего к методу вымораживания, однако имеет существенное преимущество – при повышенном давлении газовый гидрат может образовываться при положительных температурах, сокращая энергопотребление процесса.

Коллектив авторов данной работы разработал метод получения газовых гидратов, основанный на самоорганизующимся циклическом процессе кипения и конденсации гидратообразующего газа в объеме воды. Данный метод выгодно отличается от остальных высокой скоростью образования газогидрата, которая связана с набором критериев, приводящих к интенсификации процесса получения: сжиженное состояние газа позволяет ввести в реакционную среду сразу значительный объем газа; при кипении сжиженный газа создает развитую обновляемую поверхность контакта газа и воды на всплывающих пузырьках; переохлаждение реакционной среды относительно термобарических условий образования гидрата позволяет уменьшить время индукции. Одновременное наложение этих факторов значительно сокращает время образования гидрата. Особенностью метода, применительно к опреснению и очистке воды, является возможность быстро образовывать гидрат без использования химических или кинетических промоутеров (часто используемых при синтезе гидрата).

В качестве гидратообразующего газа использовался фреон 134а. Данный газ имеет массу преимуществ. Первое и самое основное – фреон 134а может образовываться при очень низких избыточных давлениях, также он имеет относительно небольшие давления насыщения, что позволяет существенно сократить стоимость производственных установок. Второе – при атмосферном давлении газовый гидрат фреона стабилен до +4 °C, что позволяет совершать над готовыми образцами различные манипуляции: отбор, промывка, отжим и т.д. Третье – фреон 134а практически нерастворим в воде, что минимизирует потери газа при потоковом получении.

В работе было исследовано влияние гидродинамических и тепловых процессов, возникающих при одновременном охлаждении и нагреве экспериментальной установки. Для этого была проведена серия, состоящая из 12 экспериментальных исследований. Шесть было проведено на растворе с концентрацией NaCl 1% и шесть с концентрацией 3,5%. При этом стенки лабораторной установки охлаждались от криостата температурой 258, 263 и 268 К. Ко дну подводилось тепло с интенсивность 600 и 2200 Вт/м2. В качестве гидратообразующего газа использовался фреон 134а. Из Рис. 1. видно, что содержание NaCl ингибирует процесс гидратообразования, но значительного влияния на процесс не оказывает. Тогда как сильный нагрев дна установки оказывает существенное влияние на процесс. В результате чего всплывающий пузырёк меньше находится в области гидратообразовнаия, что мы и видим по полученным результатам. При этом наилучший результат получался при большем охлаждении стенок лабораторной установки. Это связано с тем, что в присутствии в системе сжиженного газа, температуру стенки определяет давление в системе (так как в случае превышения давления насыщения, избыточный газ конденсируется на стенках). А уменьшение давления увеличивает переохлаждение системы относительно линии равновесия газогидрата, что существенно ускоряет рост гидрата.

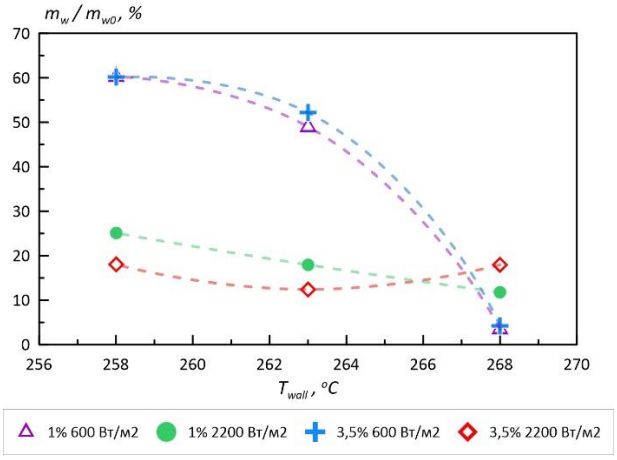


Рис. 1. Влияние перешедшей воды различной концентрации от разницы охлаждения стенок и нагрева дна лабораторной установки

Экспериментальные исследования проводились в рамках РНФ (проект № 22-79-10330), https://rscf.ru/project/22-79-10330/.

УДК 548.562

ДИССОЦИАЦИЯ ГИДРАТА SF_6 СИНТЕЗИРОВАННОГО В ВОДНОМ РАСТВОРЕ С ЧАСТИЦАМИ SiO_2

Князьков В.А., Мелешкин А.В.

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

Газовые гидраты – это кристаллические соединения, образующиеся из молекул воды и газа при низкой температуре и высоком давлении [1, 2]. Внешний кристаллический каркас (хозяин) образуется молекулами воды, которые связанны друг с другом водородными связями. Внутри каркаса находится молекула газа (гость). Взаимодействие гость-хозяин осуществляется за счет сил Ван-дер-Ваальса.

Транспортировка газового гидрата, в отличие от сжиженного газа, более безопасна и экономична [3]. Влияние различных условий эксплуатации на хранение и транспортировку газовых гидратов рассмотрены в [3, 4]. Для снижения скорости диссоциации гидрата и увеличения продолжительности его хранения необходимо: 1) увеличивать исходный размер частиц гидрата и толщину слоя порошка; 2) использовать прессованный слой частиц; 3) применять температуру, при которой происходит самоконсервации [5].

При диссоциации гидрата с частицами SiO_2 (микронного размера) на поверхности гидрата возникают газовые пузыри (рис 1). Агрегатированные частицы SiO_2 осаждаются на поверхности пленки воды, образованной в результате диссоциации, препятствуют удалению газа из слоя гидрата. Газовые пузыри в процессе диссоциации растут, объединятся из более мелких в крупные пузыри. После достижения критического размера пузыри лопаются, высвобождая накопленный газ из гидрата.

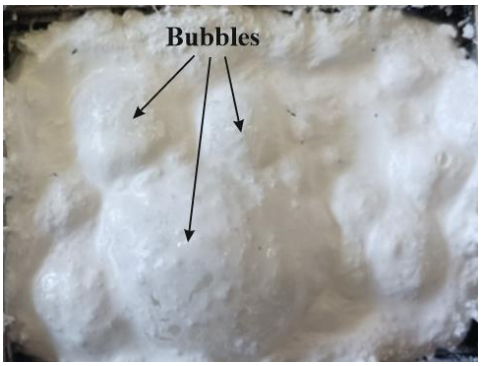


Рис. 1. Изображение гидрата SF_6 в процессе диссоциации с частицами SiO_2 концентрацией 35%.

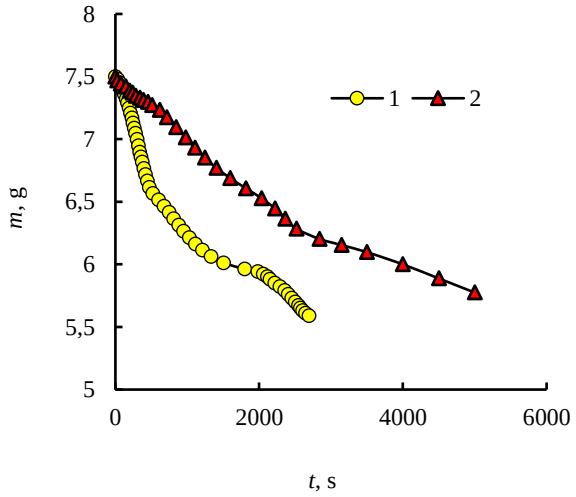


Рис. 2. Диссоциация гидрата SF_6: 1 – чистая вода, 2 – с частицами SiO_2 концентрацией 35%.

Рассмотрим влияние частиц SiO_2 на диссоциацию гидрата SF_6 (рис. 2). Из-за газовых пузырей скорость диссоциации для гидрата с частицами SiO_2 значительно меньше, чем для гидрата без частиц. В отличие от гидрата без частиц SiO_2 кривая изменения M/M_0 для большей части времени диссоциации имеет квазилинейный вид.

Таким образом, частицы SiO_2 могут эффективно применяться для увеличения времени хранения газового гидрата.

Список литературы:

1. Sloan E.D., Koh C.A., Clathrate hydrates of natural gases, 3rd ed., CRC Press. Boca Raton, FL, 2008. 752 p.
2. Istomin V.A., Yakushev V.S, Gas hydrates in nature, M.: Nedra, 1992. 235 p.
3. Javanmardi J., Nasrifar K., Najibi S.H., Moshfeghian M. Economic evaluation of natural gas hydrate as an alternative for natural gas transportation//Appl. Therm. Eng. – 2005. – V. 25. – P. 1708–1723.
4. Xie Y., Li G., Liu D., Liu N., Qi Y., Liang D., Guo K., Fan S. Experimental study on a small scale of gas hydrate cold storage apparatus//Appl. Energy – 2010. – V. 87. – P. 3340–3346.
5. Misyura S.Y., Donskoy I.G., Manakov A.Y., Morozov V.S., Strizhak P.A., Skiba S.S., Sagidullin A.K. Studying the influence of key parameters on the methane hydrate dissociation in order to improve the storage efficiency//J. Ener. Stor. – 2021. – V. **44** – P. 103288.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН
e-mail: mav@itp.nsc.ru

УДК 532.5

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВСТРЕЧНЫХ СВЕРХЗВУКОВЫХ МИКРОСТРУЙ

Корепанов М.А.[1,2], Королева М.Р.[1,2], Митрюкова Е.А.[2]

[1] Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,
426067, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, д. 34
[2] Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,
426069, Россия, Ижевск, ул, Студенческая 7

В работе рассматривается взаимодействие двух встречных сверхзвуковых потоков инертных газов, вытекающих через микросопла в пространство с низким давлением.

Задача решается в осесимметричной постановке на основе уравнений сохранения массы, импульса и энергии газа, дополненных уравнением состояния совершенного газа. В качестве рабочих сред рассматриваются инертные газы аргон и криптон. Учитывается изменение вязкости и теплопроводности газов от температуры в диапазоне ее изменения от 20К до 300К.

Осесимметричное коническое сверхзвуковое сопло характеризуется диаметром критического 145мкм, углом полураствора сопла 6°, длиной сверхзвуковой части сопла 5мм. Расчетная область включает в себя сопло, начиная с критического сечения и пространство за ним, размеры которого определяют расстояние между соплами 11мм. Поперечный размер присоединенного объема определяется параметрами торможения и подбирается в каждом случае индивидуально и составляет минимум 5мм.

На входе в сопло задаются критические параметры газа, рассчитываемые из заданных параметров торможения потока. Полное давление меняется от 2атм до 10атм, температура равняется 300К. На твердых стенках выполняется условие прилипания потока, на свободных границах присоединенного объема используются неотражающие граничные условия, позволяющие эффективно выводить газ за пределы области интегрирования с учетом давления вакуума в окружающей среде равным 0.01Па. Взаимодействие струй рассматривается в предположении симметричного распределения параметров течения относительно вертикальной плоскости, равноудаленной от срезов обоих сопел. Применение условий симметрии на данной границе существенно снижает трудоемкость численной реализации, сокращая число элементов расчетной сетки в два раза.

Задача решается методом контрольных объемов на основе авторского кода [1]. Решение задачи осуществляется с использованием блочно-структурированной сетки с четырехугольными ячейками, сгущающейся к стенке сопла и содержащей 450 тысяч расчетных ячеек. В применяемом подходе контрольные объемы совпадают с элементами сетки. Основные переменные определяются в центральных точках ячеек. Конвективный и диффузионный потоки на границе контрольной ячейки интерполируются при помощи линейной аппроксимации решения в каждой ячейке. Конвективный поток через границу ячейки определяется по схеме Годунова в результате решения задачи о распаде произвольного разрыва [2]. Для интегрирования уравнений по времени использовался трехстадийный метод Рунге-Кутта.

Результаты расчетов течения в сопле и в струе за соплом в виде распределения чисел Маха потока при давлении торможения равном 10атм приведены на рис. 1. Истечение газа в среду с низким давлением и столкновение струи с аналогичным, но противоположно направленным потоком приводит к возникновению ряду особенностей. Во-первых, течение характеризуется большими значениями чисел Маха до 7,5, которые обусловлены низкой температурой и высокими скоростями газа в струе. Во-вторых, в потоке в зоне столкновения струй формируется единичный диск Маха.

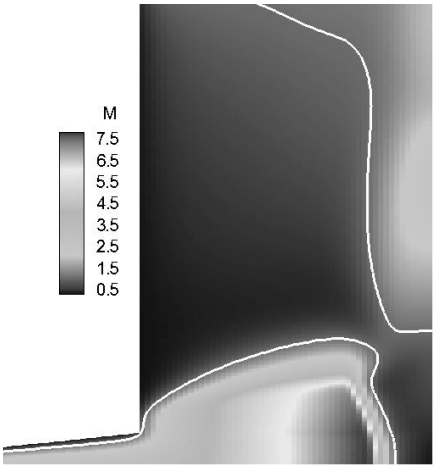


Рис. 1 Распределение чисел Маха при давлении торможения 10 атм

Белая линия на рисунке соответствует M=1. Дозвуковая область течения располагается вдоль стенки сопла и вдоль вертикальной стенки области интегрирования. Также дозвуковая зона течения формируется в области столкновения струй.

Исследования показали, что течение в сопле и в струе является автомодельным в рамках одного вида газа [3, 4].

Список литературы:

1. Korepanov M.A., Koroleva M.R., Mitrukova E.A., Nechay A.N. Nonlinear effects of krypton flow in a micronozzle with a cylindrical tube// Russian Journal of Nonlinear Dynamics. 2022. Т. 18. № 3. С. 411-422.
2. Численное решение многомерных задач газовой динамики / С.К. Годунов, А.В. Забродин, М.Я. Иванов, А.Н. Крайко, Г.П. Прокопов. М: Наука, 1976. 400с.
3. Митрюкова Е.А. Параметрические исследования течений в микросоплах Труды Института системного программирования РАН. 2023. Т. 35. № 2. С. 225-234.
4. Митрюкова Е.А. Влияние давления торможения на процесс конденсации в потоке газа за микросоплом // Сборник статей III Всероссийской научно-технической конференции памяти профессора А.В. Алиева. Ижевск, 2023. С. 261-262.

УДК 538.95

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ, ВЯЗКОСТЬ И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ НАНОЖИДКОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ВОДЫ И УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ НАНОЧАСТИЦ

Морозова М.А.[1*], Зайковский А.В.[1]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[*]morozova.itp@gmail.com

Одно из наиболее перспективных направлений в исследовании наножидкостей связано с возможностью их использования в качестве эффективных жидких теплоносителей и рабочих сред в различных устройствах, включая охлаждающие системы, системы сбора и передачи энергии, в том числе в технологиях возобновляемых источников энергии и электрохимические системы, где наножидкость может быть использована в качестве жидкого электрода. В этих направлениях актуально исследование таких свойств как теплопроводность, вязкость и электропроводность наножидкостей.

Данная работа посвящена исследованию теплопроводности, вязкости и электропроводности наножидкостей на основе воды и углеродных наночастиц.

Наножидкости были получены двухстадийным методом: на первом этапе синтезированы различные типы наночастиц, затем проведена их стабилизация базовой жидкости. Наночастицы были получены при помощи электродугового реактора плазмохимического синтеза наноматериалов [1]. Были получены разные типы углеродных наночастиц: сферические углеродные наночастицы и наночастицы меди, покрытые углеродом. Синтезированные материалы были исследованы различными методами структурного анализа. Для получения наножидкостей использовалась ультразвуковая ванна Stegler 6DT (частота 40 КГц, мощность 180 ВТ). В качестве базовой жидкости использовалась сверхчистая вода. Так как углеродные наночастицы гидрофобны, для их стабилизации в воде в ряде экспериментов использовалось поверхностно-активное вещество - додецилсульфат натрия.

Исследование теплопроводности было проведено нестационарным методом нагретой проволочки при помощи прибора, описанного в работе [2]. Исследование вязкости было проведено ротационным методом с использованием вискозиметра Fungilab Expert L. Исследование электропроводности проведено при помощи миллиомметра GOM-7804 (GW Instek).

В результате исследований получено, что теплопроводность наножидкостей снижается с ростом концентрации углеродных наночастиц для весовых концентраций до 0,04%, что не согласуется с классическим теоретическим описанием и большинством экспериментальных исследований теплопроводности наножидкостей на основе углеродных наночастиц. Снижение теплопроводности может быть связано с рядом факторов. Теплопроводность воды снижается с добавлением додецилсульфата натрия, поэтому его добавка в качестве стабилизатора в наножидкость, безусловно, влияет на теплопроводность. Также поверхностно-активное вещество образует дополнительный слой на поверхности частицы, а наличие тепловых контактных сопротивлений на границах раздела с жидкостью и с частицей может также приводить к снижению теплопроводности.

Исследование вязкости показало, что вязкость существенно не зависит от концентрации наночастиц для весовых концентраций до 0,04%, а её повышение определяется добавкой додецилсульфата натрия, что подтверждает сравнение значения вязкости для водного раствора додецилсульфата натрия с результатами, полученными для наножидкостей.

Исследование электропроводности было проведено как для наножидкостей с добавлением додецилсульфата натрия, так и для наножидкостей, полученных без добавления стабилизаторов. Исследуемые наножидкости были получены на основе медных наночастиц, покрытых углеродом. В результате исследований получено, что добавление наночастиц в массовой концентрации 0,005% в дистиллированную воду приводит к увеличению электропроводности. Однако, при увеличении концентрации наночастиц до 0,04% наблюдается тенденция к снижению электропроводности.

Список литературы:

1. Zaikovskii AV, Kardash TY, Kolesov BA, Nikolaeva OA. Graphene, SiC and Si Nanostructures Synthesis During Quartz Pyrolysis in Arc-Discharge Plasma // Phys. Stat. Sol. A.. 2019. Т. 216. № 14. С. 1900079-1-1900079-8.
2. Skripov, P.V., Smotritskii, A.A., Starostin, A.A., Shishkin A.V. A method of controlled pulse heating: Applications // J. Engin. Thermophys. 2007. Vol. 16. P. 155–163.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В СЛИЯНИЕ КАПЛИЯ ЖИДКОСТИ НА НАГРЕВАЕМИЕ ТОНКИЙ ФОЛЬГЕЕ

Мурадов. Э.Б.[1], Чеверда В.В.[2]

1)Институт Теплофизика ИТ СОРАН, e-mail: e.muradov@g.nsu.ru
2) Институт Теплофизика ИТ СОРАН, e-mail: slava.cheverda@gmail.com

Аннотация

В данной работе рассматривается теплообмен каплия жидкость при падении капель на изотермической и нагреваемой поверхности. Работа посвящена экспериментальному исследованию теплообмена при испарении капли жидкости на нагреваемой тонкой поверхности в условиях свободной конвекции.

Исследовать процесс падения одиночной капли и слияния капель на нагреваемой тонкой фольге и описать механизмы возникающих при этом явлений

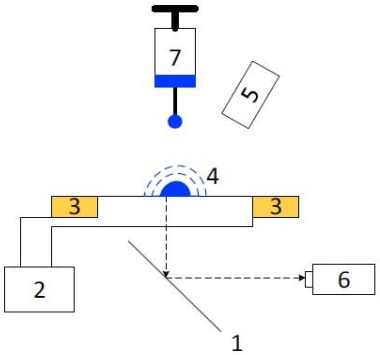
Задачи исследования:

Измеренить скорость контактной линии, температуру фольги и плотность теплового потока при падении одиночной капли

Введение

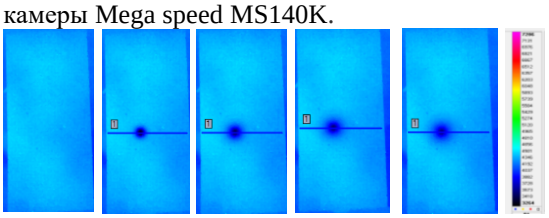
Смачивание жидкостью является наиболее простым и удобным случаем для изучения процессов теплоотвода, и этот случай помогает нам изучать трехфазную линию связи, т.е. характеристики трехфазной линии связи «газ-жидкость-твердое тело» равны легко и понятно мы учимся. Исследование жидких капель (распыление, испарение, динамика, смачивание и др.) получили большое внимание в научной литературе. [1]. Теплообмен в испаряющейся капле на горизонтальной нагретой поверхности изучался в [2], [3], [4]. Несмотря на развитие современных методик, эти работы еще не решены на 100%, что может несколько задержать развитие. **Экспериментальная установка**

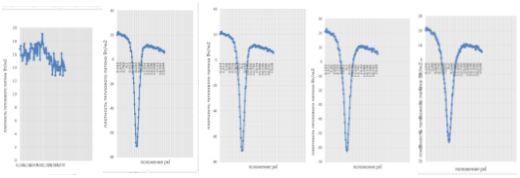
В рамках тезисе проведено экспериментальное исследование процесса падения капли жидкости на нагреваемую горизонтальную подложку.



1 – зеркало,2 – источник питания,3 – латунные электроды, с натянутой между ними константановой фольгой (25 мкм),4 – испаряющаяся жидкая капля,5 – высоко скоростная камера Mega speed MS140K,6 – ИК сканер Титаниум 570М, 7 – Шприцевой насос

Экспериментальная установка состояла из фольги толщиной 25 мкм и длиной, и шириной 80×35 мм^2 из константана (CuNi) теплопроводностью 23 Вт/(К·м). Подложка с помощью латунных электродов-держателей была подключена к источнику питания постоянного тока. Таким образом осуществлялся нагрев фольги и регулировалась тепловая мощность, выделяемая на фольге, в диапазоне от 0,2 до 2 Вт. В экспериментах температура поверхности фольги изменялась в диапазоне 25 – 35°C. Температура окружающей среды составляла примерно 25°C. Температура фольги измерялась с помощью тепловизора TitaniumHD 570 M. Разрешение инфракрасной камеры в экспериментах составляло 640×512 пикселей, частота сканирования – 50 Гц, температурное разрешение – 0,1 K. Обратная сторона фольги была покрыта слоем черной графитовой краски с коэффициентом излучения, приблизительно равно к 1. Средний коэффициент теплоотдачи от поверхности фольги к окружающему воздуху находился в пределах 16 −20 Вт/м^2·K. Эти данные были получены с помощью расчетам с использованием термограмм поверхности фольги без капли. Капля подавалась на фольгу с помощью шприцевого насоса Cole-Parmer EW-74905-54 и шприца Hamilton 50 мл. Для наблюдения процесса слияния капель использовалась скоростная видеокамера Mega speed MS140K. Тепловая мощность, выделяемая на фольге, изменялась с помощью источника питания TTi QPX 1200L. В экспериментах использовались капли объёмом 5 и 12 мкл. В качестве жидкости использовалась дистиллированная и деонизированная вода. Процесс падения капли фиксировался с использованием высокоскоростной камеры Mega speed MS140K.





0 sec. *0,040 sec.* *0,080 sec.* *0,160 sec..* *0,280 sec.*

УДК 537.9

О ТРАНСПОРТЕ ИОНОВ ВБЛИЗИ КРИСТАЛЛА НИОБАТА ЛИТИЯ В ПРОЦЕССЕ ПРОТОНИРОВАНИЯ

Демин В.А., Петухов М.И.

Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614068, Россия, Пермь, ул. Букирева, 15

В работе приводятся результаты аналитического и численного решения уравнений переноса и электродинамики, описывающие диффузию, электромиграцию и рекомбинацию ионов, которые принимают участие в реакции протонного обмена в случае взаимодействия молекул расплава бензойной кислоты с кристаллом ниобата лития. Со стороны межфазной границы в расплав проникают отрицательные бензоат-ионы и положительные ионы лития. Подвижность ионов лития на порядок больше, чем у бензоат-ионов, что приводит к разным профилям концентрации и, как следствие, формированию электрического поля. По мере продвижения в объем общее количество ионов уменьшается из-за рекомбинации в результате которой образуются молекулы бензоата лития.

Как показали результаты расчетов [1,2], при рассмотрении малых по размерам расчетных областей, бензоат-ионы формируют пограничный слой с характерной толщиной ~ 10^{-7} м. Также было установлено, что в поставленной задаче не возникают условия для конвективного переноса. Данное обстоятельство существенно опрощает постановку задачи. Так, для описания транспорта ионов в расплаве бензойной кислоты достаточно использовать одномерные уравнения переноса

$$\frac{\partial n_\pm}{\partial t} = D_\pm n_\pm'' \pm k_\pm \left(n_\pm'\varphi' + n_\pm\varphi''\right) - k_R n_+ n_-$$

и электростатики

$$\varepsilon_0\varepsilon\varphi'' = e\left(n_- - n_+\right).$$

Здесь $n_\pm$ и φ – поля концентрации положительных и отрицательных ионов, а также электрического потенциала. Параметры $D_\pm$, $k_\pm$ и k_R обозначают коэффициенты диффузии, подвижности и коэффициент рекомбинации ионов. Константы ε_0, ε и e – электрическая постоянная, диэлектрическая проницаемость расплава бензойной кислоты и заряд электрона. Штрихом обозначается производная по координате x. Соответствующая ось направлена по нормали к поверхности кристалла в сторону расплава. Начало координат совпадает с расположением межфазной границы. Данная граница рассматривается как источник ионов обоих знаков, а также как точка отсчета для определения электрического потенциала:

$$x = 0: \quad n_\pm' = -\frac{J}{D_\pm}, \qquad \varphi = 0,$$

где J – плотность потока ионов.

На расстоянии h от подложки моделируется непроницаемая стенка ректора на которой в дополнение отсутствует электрическое поле:

$$x = h: \quad n_\pm' = 0, \qquad \varphi' = 0.$$

Поставленная краевая задача имеет аналитическое решение, которое было получено с применением метода многих масштабов в допущении пренебрежимо малого влияния электромиграционных слагаемых в уравнениях переноса. Из данного решения следует, что толщину формируемого бензоат-ионами пограничного слоя растет с размерами реактора h по степенному закону:

$$\delta = \frac{5h^{\frac{1}{4}}}{\left(\frac{k_R J}{D_-}\left(\frac{1}{D_-} - \frac{1}{D_+}\right)\right)^{\frac{1}{4}}}.$$

С другой стороны, учет электромиграции стабилизирует профили концентрации и ограничивает рост пограничного слоя (рис. 1).

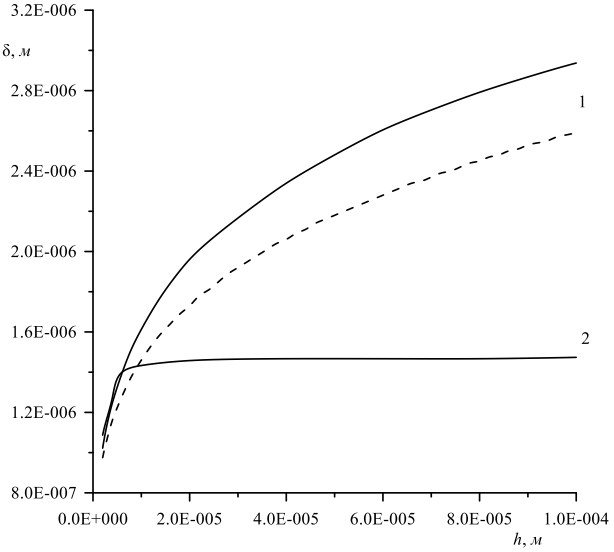


Рис. 1. Толщина пограничного слоя бензоат-ионов при D_+ = 10^{-8} м^2/с, D_- = 10^{-9} м^2/с, k_+ = $1.5\cdot10^{-7}$ м^2/сВ, k_- = $2\cdot10^{-8}$ м^2/сВ, k_R = $1.5\cdot10^{-15}$ м^3/с, J = 10^{18} с$^{-1}$м$^{-2}$, ε = 10: 1 – без учета электромиграции (штриховая линия – аналитическое решение, сплошная линия – численное решение); 2 – численное решение с учетом электромиграции

Таким образом, при более реалистичных значениях h и учете электроомиграции толщина пограничного слоя достигает ~ 10^{-6} м. Ионы лития также формируют пограничный слой на порядок больший, чем бензоат-ионы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-20277

Список литературы:

1. Demin V.A., Petukhov M.I., Ponomarev R.S. An ionic boundary layer near the lithium niobate surface in the proton exchange process. Surface engineering and applied electrochemistry, 59, 3, 321-328, 2023.
2. Demin V.A., Petukhov M.I., Ponomarev R.S., Kuneva M. Dynamics of the Proton Exchange Process in Benzoic Acid Interacting with Lithium Niobate Crystals. Langmuir, 39, 10855-10862, 2023.

УДК 532.133+538.931+544.773

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЯЗКОСТИ И РЕОЛОГИИ НАНОЖИДКОСТЕЙ С ОДНОСТЕННЫМИ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

Рудяк В.Я.[1], Рафальская Т.А.[1]

[1] Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008, Россия, Новосибирск, ул. Ленинградская, 113

Дисперсные жидкости с углеродными нанотрубками (УНТ), как и с обычными сферическими наночастицами, принято называть наножидкостями. Ясно, однако, что это необычные наножидкости, поскольку дисперсные частицы существенно анизотропны. Диаметр УНТ изменяется от 1 до 100 нм, тогда как их длина может составлять десятки микрометров. Существующие экспериментальные данные [1,2] свидетельствуют о том, что наножидкости с УНТ как правило, неньютоновские. Причина изменения реологии, однако, не ясны. Единственным методом, который может пролить свет на механизмы изменения реологии является метод молекулярной динамики.

В настоящее время изучается возможность применения наножидкостей с УНТ в качестве составляющих буровых растворов и в различных смазочных материалах. И в том, и в другом случаях имеют место высокие скорости сдвига. Поэтому, если стоит задача изучения реологии наножидкостей с УНТ при высоких скоростях сдвига, необходимо использовать неравновесный метод молекулярной динамики. Это и является целью данной работы.

Неравновесный метод молекулярной динамки использовался в варианте с моделированием течения Куэтта между двумя пластинами. Ячейка моделирования представляла собой прямоугольный параллелепипед. В направлениях, не ограниченных стенками, ставились периодические граничные условия. Стенки моделировались набором атомов меди, расположенных в узлах гранецентрированной кристаллической решетки. Им сообщались направленные в разные стороны скорости, в канале устанавливался линейный профиль скорости молекул. Скорость сдвига $\dot{\gamma}$ определялась по профилю скорости, а напряжение сдвига τ – по касательным напряжениям тензора напряжений с осреднением по объему. Коэффициент вязкости η вычислялся по сдвиговому напряжению жидкости: $\eta = \tau/\dot{\gamma}$.

В силу анизотропии УНТ одной из главных задач являлось изучение влияния на вязкость длины УНТ. Моделировалась вязкость наножидкости на основе бензола с одностенными УНТ. Их диаметр равнялся 1.1 нм, а длина изменялась от 1.45 до 14.96 нм. Во всех случаях объемная концентрация УНТ была 2 %.

Моделирование выполнялось в канале с достаточно большим расстоянием между стенками (30 нм), так, чтобы вязкость бензола и наножидкости при малых скоростях сдвига соответствовала вязкости в объеме. Взаимодействие молекул жидкости между собой, с атомами стенок канала и нанотрубок, а также атомов соседних нанотрубок, описывалось потенциалом Леннарда-Джонса. Взаимодействие молекул углерода между собой внутри каждой УНТ задавалось потенциалом AIREBO.

Установлено, что при сравнительно низких скоростях сдвига (до 10^8 c^{-1}) наножидкости являются ньютоновскими. Это иллюстрирует рис. 1, где нижняя кривая соответствует бензолу, а последующие снизу вверх наножидкостям с УНТ размером 1.45, 3.90, 5.38, 7.59, 10.29, 14.96 нм. Вязкость бензола, как уже отмечалось, согласуется с экспериментальными данными, а наножидкостей с данными работы [3], где вязкость наножидкостей с такими же УНТ моделировалась с помощью равновесной молекулярной динамики. Вязкость наножидкостей растет с увеличением длины УНТ, и она существенно превышает вязкость бензола. При максимальной длине УНТ это превышение составляет почти 30 %.

При увеличении скорости сдвига длинные УНТ выстраиваются вдоль течения и скорость их движения увеличивается. При больших скоростях сдвига УНТ любого размера движутся со скоростями, сопоставимыми со скоростью движения базовой жидкости и вязкость наножидкости перестает зависеть от длины нанотрубок.

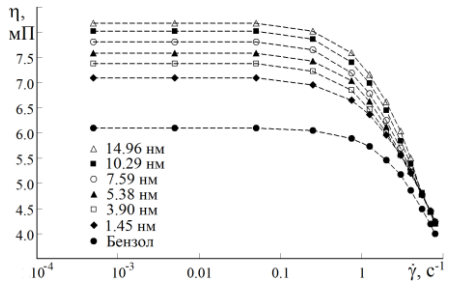


Рис. 1. Реология наножидкости с нанотрубками различной длины

В заключительной части работы обсуждаются механизмы, определяющие процессы переноса импульса. Во всех случаях получены корреляции, описывающие вязкость наножидкостей в зависимости от скорости сдвига и длины УНТ.

Список литературы:

1. Rudyak V., Minakov A., Pryazhnikov M. Preparation, characterization, and viscosity studding the single-walled carbon nanotube nanofluid // J. Molecular Liquids. 2021. V. 329. No. 1. P. 115517.
2. Rudyak V.Ya., Dashapilov G.R., Minakov A.V., Pryazhnikov M.I. Comparative characteristics of viscosity and rheology of nanofluids with multi-walled and single-walled carbon nanotubes. Diamond and Related Materials. 2023. V. 132. P. 109616.
3. Rudyak V.Ya., Krasnolutskii S.L., Lezhnev E.V. Molecular dynamics study of nanofluids viscosity with carbon tubes // Nanosystems: Phys. Chem. Math., 2024, 15 (1), 0–8.

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 20-19-00043).

УДК 532.135:532.584:536.22:544.77

СОПОСТАВЛЕНИЕ И АНАЛИЗ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОЖИДКОСТЕЙ С УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

Рудяк В.Я.[1]

[1] Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет,
630008, Россия, Новосибирск, ул. Ленинградская, 113

Изучение наножидкостей мотивировано двумя причинами. Во-первых, уже существующими и возможными многочисленными приложениями. Вторая причина имеет фундаментальную составляющую – наножидкости являются необычным дисперсным флюидом и их свойства не описываются классическими теориями для крупнодисперсных жидкостей (Дж. Максвелла, А. Эйнштейна и т.д.). Связано это с мезоскопическими размерами дисперсных частиц, и сегодня физика имеющих место соответствующих особенностей свойств переноса в целом понятна.

Однако наножидкостями принято называть и дисперсные жидкости с углеродными нанотрубками (УНТ), которые могут быть одностенными (ОУНТ) и многостенными (МУНТ). Морфология тех и других достаточно сложная, но в любом случае можно отметить характерную особенность – их длина обычно составляет микрометры или даже десятки микрометров. Таким образом, УНТ фактически являются микрочастицами. С этой точки зрения свойства переноса соответствующих наножидкостей должны описываться классическими теориями. Экспериментальные данные, полученные в последние пятнадцать лет, показывают, что это не так. Эти данные чрезвычайно разнородны и практически не сопоставимы, поскольку эксперименты выполнялись фактически с существенно различными наножидкостями (разные базовых жидкости, дисперсанты, размеры УНТ и т.д.). Чтобы получить возможность сопоставить свойства наножидкостей с УНТ необходимо исследовать определенные их классы, созданные на основе одинаковых базовых жидкостях и УНТ. Такие эксперименты были выполнены впервые в [1–4]. Появилась возможность сопоставить и проанализировать свойства переноса наножидкостей с ОУНТ и МУНТ. Это и является целью данной работы. Такое сопоставление и анализ делается на конференции впервые.

Рассмотрены наножидкости на основе изопропилового спирта, этиленгликоля и воды. В ряде случаев применялись поверхностно активные вещества (ПАВ): СДБС, СДС, ПВП. Для приготовления наножидкостей использовались ОУНТ (OCSiAl, Новосибирск) и МУНТ (Таунит-М и Таунит-МД, Нанотех Центр, Тамбов). Весовые концентрации УНТ варьировались от 0.05 до 0.25%, а ПАВа – либо равнялись концентрациям УНТ, либо вдвое их превышали. Наножидкости приготавливались двухшаговым методом. Измерялась их вязкость, теплопроводность и электропроводность.

Установлено, что все наножидкости с ОУНТ неньютоновские, их реология хорошо описывается моделью степенной жидкости или жидкости Хершеля–Балкли [1,2]. Индекс жидкости снижается по мере увеличения концентрации ОУНТ, а параметр консистентности напротив растет. Степень неньютоновости этих жидкостей увеличивается с уменьшением аспектного отношения. Наножидкости с МУНТ имеют существенно более низкую вязкость, чем с ОУНТ при одинаковой весовой концентрации. Это объясняется их существенно меньшей численной концентрацией.

При изучении теплопроводности показано [3], что наножидкости с ОУНТ во всех случаях имеют теплопроводность значительно выше, чем с МУНТ, если их весовые концентрации одинаковы. Максимальное превышение коэффициента теплопроводности равное 50% зафиксировано у наножидкости на основе изопропилового спирта с ОУНТ при концентрации 0.2%. Во всех случаях превышение теплопроводности тем выше, чем ниже коэффициент теплопроводности базовой жидкости. Использование ПАВов в общем случае приводит к увеличению теплопроводности наножидкостей.

Наконец при изучении электропроводности [4] показано, что наножидкости с ОУНТ имеют значительно более высокую электропроводность по сравнению с наножидкостями с МУНТ. Электропроводность наножидкостей может возрастать на много порядков. Механизмы электропроводности существенно иные, чем теплопроводности. В частности, использование ПАВов приводит к снижению электропроводности.

В заключение обсуждаются механизмы, определяющие высокую вязкость, теплопроводность и электропроводность наножидкостей с УНТ, включая особенности формирования в них перколяционной структуры УНТ. Ее формирование является пороговым явлением и начинается по достижению определенной концентрации, которая у ОУНТ существенно ниже, чем у МУНТ. Наличие перколяционной структуры определяет и вязкоупругие свойства всех изученных наножидкостей.

Список литературы:

1. Rudyak V., Minakov A., Pryazhnikov M. Preparation, characterization, and viscosity studding the single-walled carbon nanotube nanofluid // J. Molecular Liquids. 2021. V. 329. No. 1. P. 115517.
2. Rudyak V.Ya., Dashapilov G.R., Minakov A.V., Pryazhnikov M.I. Comparative characteristics of viscosity and rheology of nanofluids with multi-walled and single-walled carbon nanotubes // Diamond and Related Materials. 2023. V. 132. P. 109616.
3. Rudyak V.Ya., Pryazhnikov M.I., Minakov A.V., Shupik A.A. Comparison of thermal conductivity of nanofluids with single-walled and multi-walled carbon nanotubes // Diamond and Related Materials. 2023. V. 139. P. 110376.
4. Rudyak V., Pryazhnikov M., Minakov A., Shupik A. Electrical conductivity of nanofluids with single- and multi-walled carbon nanotubes. Experimental study // Nano-Structures and Nano-Objects. 2024. V. 38. P. 101143.

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 20-19-00043).

УДК 548.562

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ПУЗЫРЬКА SF_6

Сластная Д. А.[1], Вожаков И. С.[1], Мелешкин А. В.[1]

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

Понимание механизмов образования гидратов является ключевым аспектом в разработке эффективных методов и технологий по предотвращению или управлению процессами гидратообразования. Самопроизвольное образование гидратов может стать причиной серьезных осложнений в работе нефтегазовой промышленности, таких как забивание трубопроводов и уменьшение эффективности добычи топлива. Численное моделирование процесса гидратообразования позволяет предсказывать и анализировать характеристики и поведение гидрата в различных условиях. Это способствует развитию и оптимизации процесса добычи, транспортировки и хранения газа, а также разработке более эффективных и безопасных методов работы с гидратами.

В работе представлена математическая модель роста гидратной оболочки на поверхности пузырька газа, находящегося в жидкости. Предполагается, что гидрат на поверхности пузырька представляет собой тонкую пористую структуру, которая допускает одновременный массоперенос газа и жидкости. Утолщение гидратной оболочки осуществляется в двух направлениях: на границе раздела жидкость/гидрат и на границе раздела газ/гидрат (рисунок 1). Образование гидрата на границе жидкость/гидрат определяется процессом массопереноса газа через гидрат. На границе газ/гидрат гидратообразование контролируется скоростью проникновения воды сквозь гидрат под действием капиллярных сил. В модели гидратная оболочка предполагается сферической и однородной, таким образом рассматривается только вертикальный рост.

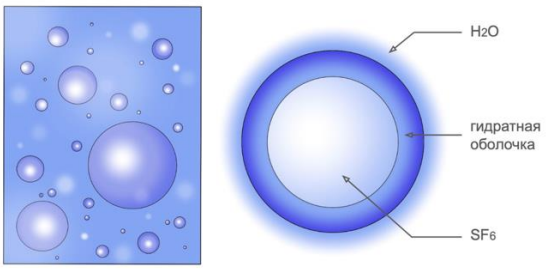


Рисунок 1. Схема роста гидратной оболочки на поверхности пузырька

Исследуемый газ – гексафторид серы SF_6: молярная масса – 0.146 моль/кг, плотность – 6.17 кг/м^3. Рассматриваемая жидкость – вода. Плотность гидрата 1649.1 кг/м^3. Коэффициент диффузии газа через гидрат и жидкость рассчитывался с помощью молекулярной модели, полученные значения составляю $D_h = 9.2 \cdot 10^{-10}$, $D_w = 3.2 \cdot 10^{-9}$. Пористость гидратной оболочки считалась постоянной и значение было взято из литературы $\phi = 0.14$ [1,2]. Начальный радиус пузырька газа $R_0 = 4$ мм, начальная толщина гидратной оболочки $\delta_0 = 1$ мкм. Разработана математическая модель образования гидрата на межфазной поверхности H_2O / SF_6.

Результат численного моделирования роста гидратной оболочки на поверхности пузырька гексафторида серы при степени переохлаждения газа 16 К представлен на рисунке 2. Линией отображаются данные математического моделирования, точками – значения, полученные в ходе эксперимента. Численное моделирование корректно описывает процесс образования гидрата на поверхности пузырька гексафторида серы. Изучение влияния степени переохлаждения на процесс гидратообразования позволяет определить зависимость кинетики роста гидратной оболочки от концентрации соли в жидкости. Так как наличие соли в растворе приводит к смещению линии стабильности гидрата в сторону уменьшения степени переохлаждения.

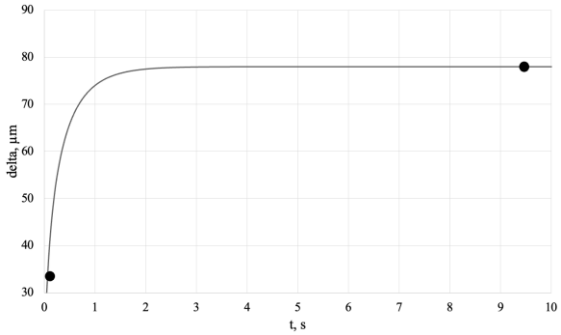


Рисунок 2. Изменение толщины гидратной оболочки на поверхности пузырька гексафторида серы: линия – численное моделирование, точки – экспериментальные значения.

Исследование проводилось в рамках РНФ (проект № 22-79-10330), https://rscf.ru/project/22-79-10330/.

Список литературы:

1. Sun X. et al. Modeling of dynamic hydrate shell growth on bubble surface considering multiple factor interactions //Chemical Engineering Journal. – 2018. – Т. 331. – С. 221-233.
2. Sun X. et al. A hydrate shell growth model in bubble flow of water-dominated system considering intrinsic kinetics, mass and heat transfer mechanisms //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2018. – Т. 117. – С. 940-950.

УДК 536.24

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЕВИТИРУЮЩИХ МИКРОКАПЕЛЬ КОНДЕНСАТА ВОДЫ НАД СМОЧЕННОЙ И СУХОЙ НАГРЕВАЕМЫМИ ПОДЛОЖКАМИ

Шатекова А.И., Зайцев Д.В.

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

Целью настоящей работы являлось исследовать левитацию микрокапель конденсата воды (размером порядка 10 мкм) над поверхностью жидкости и над сухой поверхностью в широком диапазоне изменения параметров эксперимента (микрокапли конденсата левитируют за счет потока Стефана).

Поставленные задачи исследовались экспериментальными методами. На рис.1. представлена фотография экспериментального стенда. рабочем участке, который представляет собой цилиндр из стеклотекстолитового основания диаметром 24 мм, в центре которого впрессован медный стержень круглого сечения диаметром 3 мм. Этот стержень служит нагревательным элементом. В экспериментах использовалась сверхчистая, дегазированная вода MilliQ. В центре нагревателя, в верхней его части, была установлена термопара для измерения температуры поверхности нагревателя.

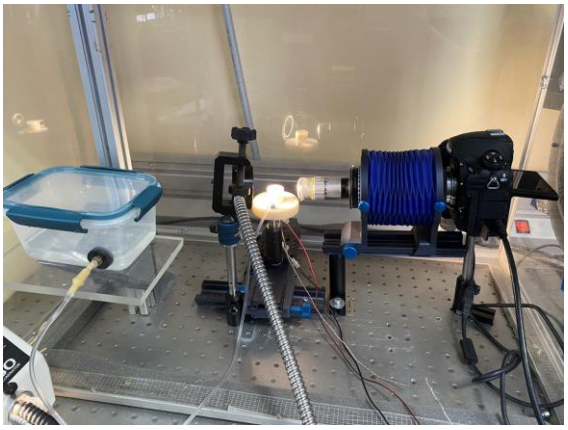


Рис.1. Фото экспериментального стенда

Микрокапли жидкости в двумерном массиве подвергаются постоянному конденсационному росту до тех пор, пока размер капель не достигнет критического значения, при котором капли коаллисцируют со слоем жидкости. На рис.2 представлен график зависимости скорости роста капель от температуры подложки. Как видно из графика скорость роста капель прямо пропорционально температуре подложки. Это связано с тем, что с ростом температуры подложки увеличивается интенсивность испарения слоя жидкости и как следствие капли конденсируются быстрее. При нагреве пленки жидкости с сухим пятном, над ее поверхностью образуются микрокапли конденсата, которые скатываются в сухую область подложки и левитируют какое-то время (порядка одной секунды) над сухой поверхностью, пока не испарятся полностью. На рис. 3 представлен график зависимости скорости испарения капель от температуры подложки. Как видно из графика, с ростом температуры подложки скорость испарения капель увеличивается. Как видно из угловых коэффициентов линейно аппроксимации экспериментальных данных, скорость испарения капель над сухой подложкой намного выше скорости конденсации капель над смоченной поверхностью.

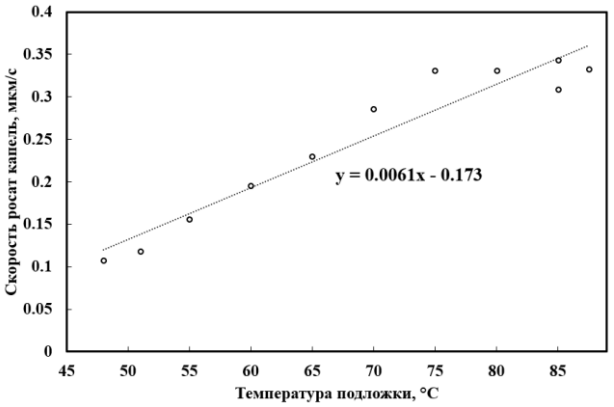


Рис.2. Зависимость скорости роста капель от температуры подложки (над смоченной поверхностью). Параметры эксперимента: относительная влажность воздуха 33%, h =0,6 мм.

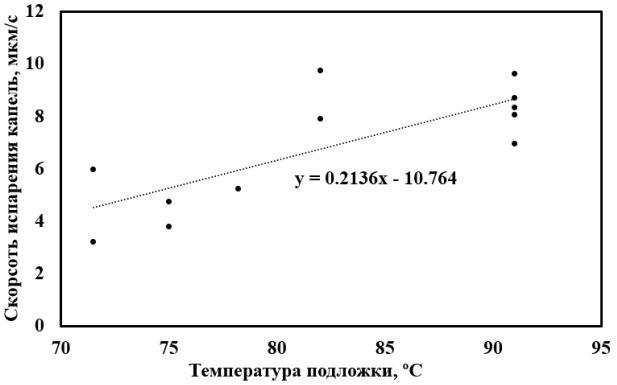


Рис.3. Зависимость скорости испарения капель от температуры подложки (над сухой поверхностью). Параметры эксперимента: относительная влажность 30%.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 23-29-00982)

Секция 8 Теплофизические свойства веществ и лучистый теплообмен

УДК 536.412:669.45′882′884

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКИХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Li-K-Pb

Агажанов А.Ш., Абдуллаев Р.Н., Хайрулин Р.А., Хайрулин А.Р.

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

Жидкие сплавы щелочных металлов (ЩМ) со свинцом относятся к уникальному классу веществ, так называемых ионных расплавов, в которых помимо металлического типа межатомного взаимодействия в значительной степени проявляется ионная (или ионно-ковалентная) связь [1–4]. Появление ионной связи обусловлено тем, что разница в электроотрицательности между ЩМ и Pb оказывается достаточной для частичного смещения валентных электронов ЩМ к атомам Pb. Из-за этого возникает тенденция к формированию в этих расплавах химического ближнего порядка в виде ассоциированных комплексов, в которых оказывается запертой значительная часть валентных электронов. Предполагается, что в жидких сплавах свинца с легкими ЩМ (Li и Na) преобладают «октетные» ионные комплексы вида $ЩМ_4^+Pb^{4-}$ (четыре катиона $ЩМ^+$ располагаются вокруг аниона Pb^{4-}). В жидких сплавах свинца с тяжелыми ЩМ (K, Rb и Cs) формируются полианионные тетраэдрические кластеры $[Pb_4]^{4-}$ с общим зарядом –4, вокруг которых кулоновскими силами также удерживаются четыре катиона $ЩМ^+$. Подобные кластеры в литературе именуются ионами Цинтля (Zintl) [1–4]. Однако, если для бинарных расплавов ЩМ–Pb имеется обширная экспериментальная информация по многим структурно-чувствительным параметрам, то для трёхкомпонентных жидких систем типа A–B–Pb (где A и B – соответственно легкий и тяжелый ЩМ) практически отсутствуют какие-либо сведения. Особый интерес представляет тройная система Li–K–Pb, в которой могут образовываться как октетные комплексы $Li_4^+Pb^{4-}$, так и полианионные структуры $K_4^+[Pb_4]^{4-}$. При этом известно, что литий и калий практически нерастворимы друг в друге как в твердом, так и в жидком состояниях (вплоть до 1200 K) [5].

Целью настоящей работы являлось экспериментальное измерение плотности (ρ) и объемного коэффициента термического расширения (β) сплавов Li–K–Pb в жидком состоянии в интервале от температуры ликвидуса (T_L) до 1000 K. Были исследованы следующие сплавы: Li_3KPb_4, $LiKPb_2$, LiK_3Pb_4, LiKPb, $Li_4K_3Pb_4$, Li_4KPb_2, $Li_{16}K_3Pb_7$ и Li_5KPb_3. Основные сложности при работе с расплавами ЩМ заключаются в их высокой химической активности и высоком давлении паров. Данные ограничения были успешно преодолены бесконтактным методом просвечивания образцов узким пучком гамма-излучения (гамма-метод [5]) с использованием герметичной измерительной ампулы, заполненной инертным газом. Приготовление сплавов осуществлялось в атмосфере высокочистого аргона (99,999 об.%) внутри перчаточного бокса, оснащенного электронными аналитическими весами, имеющими погрешность 2–3 мг, и сварочным аппаратом. На рис. 1 представлены типичные результаты по ρ и β для одного из образцов (сплав $LiKPb_2$), полученные в интервале от T_L = 784 K до 1000 K с общей неопределенностью 0,5–0,8% и 3–7% для ρ и β, соответственно.

Результаты сканирование расплавов пучком гамма-излучения на разной высоте образцов показали, что исследуемые расплавы были достаточно однородными по составу и плотности. Из этого можно предположить, что сильное химическое взаимодействие между свинцом и ЩМ, которое наблюдается в бинарных сплавах Pb–ЩМ [1–4], подавляет тенденцию к расслоению с учетом практически полной несмешиваемости чистых расплавов Li и K [5].

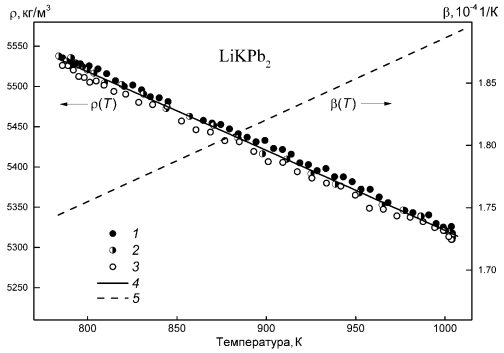


Рис. 1. Плотность (ρ) и объемный коэффициент термического расширения (β) расплава $LiKPb_2$: 1, 2, 3 – данные 1-го, 2-го и 3-го измерений ρ, соответственно, 4 – аппроксимация ρ(T), 5 – аппроксимация β(T).

Список литературы:

1. van der Lugt W. Zintl ions as structural units in liquid alloys // Phys. Scr. 1991. Vol. T39. P. 372–377.
2. van der Lugt W. Polyanions in liquid ionic alloys: a decade of research // J. Phys. Condens. Mat. 1996. Vol. 8. No. 34. P. 6115–6138.
3. Saboungi M.L., Geertsma W., Price D.L. Ordering in liquid alloys // Annu. Rev. Phys. Chem. 1990. Vol. 41. No. 1. P. 207–244.
4. Гантмахер В.Ф. Химическая локализация // Успехи физических наук. 2002. Т. 172. № 11. С. 1283–1293.
5. Хайрулин Р.А., Абдуллаев Р.Н., Станкус С.В. Растворимость калия, рубидия и цезия в жидком литии при высоких температурах // Теплофизика и аэромеханика. 2021. Т. 28. № 1. С. 157–161.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10095, https://rscf.ru/project/23-79-10095/.

УДК 536.631, 549.645

УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОЕМКОСТЬ ЛЕЙЦИТА В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР 300–980 К

Самошкин Д.А., Агажанов А.Ш., Станкус С.В.

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

Лейцит или алюмосиликат калия, имеющий кристаллическую фазу $KAlSi_2O_6$, является породообразующим минералом магматического происхождения. В последние годы лейцит стал использоваться в качестве основной кристаллической фазы в новом поколении композитной стоматологической керамики [1–3]. Добавление лейцита в состав стоматологического фарфора увеличивает прочность, износостойкость и тепловое расширение материала, делая возможным его сплавление с металлической арматурой [1–4]. Кроме того, было обнаружено, что лейцит улучшает показатели вязкости разрушения конечного стоматологического продукта [1, 3]. Лейцитсодержащую стеклокерамику также можно использовать в качестве биоактивных материалов для замены твердых тканей [2]. Надежные и систематизированные данные по теплофизическим свойствам (в том числе по теплоемкости) минералов необходимы для конструирования на их основе новых материалов и их успешное внедрение в разных областях промышленности, а также для моделирования, контроля, перепроектирования, переработки, разработки промышленных процессов и для моделирования и интерпретации геологических процессов. Однако обзор имеющейся в литературе информации показал, что теплоемкость лейцита исследована недостаточно подробно. Исходя из этого, целью данной работы являлось экспериментальное исследование удельной теплоемкости порошка лейцита в широком интервале температур.

Удельная теплоемкость c_p исследовалась методом дифференциальной сканирующей калориметрии [5] на экспериментальной установке DSC 404 F1 фирмы NETZSCH в интервале температур 300–980 К. Опыты проводились с использованием порошка лейцита (средний размер частиц 20–40 мкм), предварительно прогретого до 1300 К. Измерения осуществлялись с использованием платиновых тиглей с корундовыми вкладышами и платиновых крышек со скоростью нагрева 10 К/мин в проточной атмосфере аргона особой чистоты (99,999 об.%). Скорость потока аргона в печи калориметра составляла 20 мл/мин. Масса исследуемого порошка лейцита взвешивалась на электронных весах AND GH-252 с погрешностью не более 0,3 мг и равнялась 51 мг. В качестве калибровочного образца использовался сапфир массой 85,3 мг. Оцениваемая погрешность полученных данных по c_p, подтвержденная экспериментами с образцами высокочистой платины и сапфира, составила 2–3%.

Экспериментальные данные одного из нагревов и охлаждений по c_p исследованного порошка лейцита представлены на рис. 1. Видно, что результаты очень хорошо согласуются между собой. Также из рис. 1 можно заметить, что в интервале температур ~820–950 К протекает фазовое превращение, которое проявляется в виде двух максимумов на температурной зависимости удельной теплоемкости и небольшим гистерезисом c_p в цикле нагрева-охлаждения. Из [6] следует, что данные особенности обусловлены двумя фазовыми перестройками решетки. При нагреве низкотемпературная тетрагональная фаза-1 лейцита, имеющая пространственную группу симметрии $I4_1/a$, меняется на промежуточную тетрагональную фазу-2 с пространственной группой $I4_1/acd$ (пик с большей амплитудой на рис. 1). И далее тетрагональная фаза-2 с пространственной группой $I4_1/acd$ переходит в высокотемпературную кубическую фазу с пространственной группой $Ia3d$ (пик с меньшей амплитудой на рис. 1).

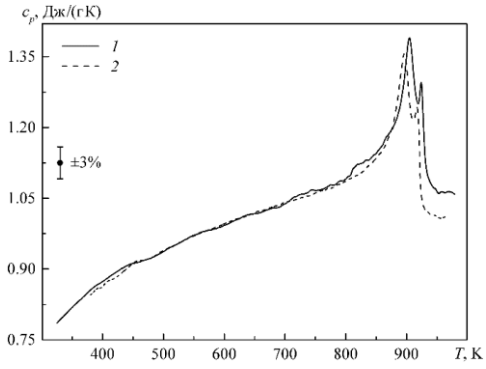


Рис. 1. Удельная теплоемкость лейцита: 1 – нагрев, 2 – охлаждение.

Список литературы:

1. Novotna M., Klouzkova A., Maixner J., Satava V. Preparation of leucite powders with controlled particle size distribution // Ceram-Silikaty. 2005. Vol. 49. No. 4. P. 252-258.
2. Holand W., Rheinberger V., Apel E., van't Hoen C., Holand M., Dommann A., Obrecht M, Mauth C., Graf-Hausner U. Clinical applications of glass-ceramics in dentistry // J. Mater. Sci: Mater. Med. 2006. Vol. 17. No. 11. P. 1037-1042.
3. Klouzkova A., Mrazova M., Kohoutkova M. Synthesis of partially stabilized leucite // J. Phys. Chem. Solids. 2007. Vol. 68. No. 5-6. P. 1207-1210.
4. Zhang Y., Qu C., Wu J., Lu M., Rao P., Liu X. Synthesis of leucite from potash feldspar // J. Wuhan Univ. Technol. 2008. Vol. 23. No. 4. P. 452-455.
5. Samoshkin D.A., Stankus S.V., Agazhanov A.Sh. Heat capacity of corrosion-resistant refractory alloy ChS88U-VI in the temperature range of 300–1270 K // J. Eng. Thermophys. 2023. Vol. 32. No. 4. P. 692-696.
6. Palmer D.C., Dove M.T., Ibberson R.M., Powell B.M. Structural behavior, crystal chemistry, and phase transitions in substituted leucite: High-resolution neutron powder diffraction studies // Am. Mineral. 1997. Vol. 82. No. 1-2. P. 16-29.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН 121031800219-2.

УДК 536.441

КРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ, КОЭФФИЦИЕНТЫ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НЕКОТОРЫХ АМИНОСПИРТОВ

Богатищева Н.С., Попов А.П., Никитин Е.Д., Галкин Д.А.

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

Одним из эффективных способов сократить выбросы углекислого газа в атмосферу является применение технологий улавливания и захоронения углерода (carbon capture and storage technology — CCS). При разработке метода CCS важное значение имеют экологичность и рентабельность технологий, которые зависят от физико-химических свойств используемых абсорбентов.

В докладе будут представлены результаты измерения критической температуры, критического давления, коэффициентов температуропроводности и теплопроводности трех аминоспиртов: моноэтаноламина (МЭА), диэтаноламина (ДЭА) и 2-амино-2-метил-1-пропанола (АМП), которые являясь химическими абсорбентами CO_2, могут быть использованы в составе перспективных гибридных поглотителей [1].

Экспериментальные данные о критических параметрах АМП отсутствуют в литературе. Результаты измерения критического давления МЭА, полученные различными авторами, отличаются на величину, превышающую погрешность измерений. Было отмечено, что при нагревании МЭА до критической температуры наблюдалось интенсивное разложение соединения [2]. Это означает, что стандартные методы измерения критических свойств веществ, предполагающие длительное термостатирование, не применимы по отношению к аминоспиртам.

Для экспериментального определения критической температуры и критического давления исследуемых соединений был использован метод импульсного нагрева [3]. Метод основан на измерении температуры достижимого перегрева исследуемого образца в зависимости от давления с помощью платинового зонда диаметром 20 мкм, который служит одновременно нагревателем и термометром сопротивления. Критическая точка является общей вершиной бинодали, спинодали и линии достижимого перегрева на фазовой диаграмме. Таким образом, при повышении давления температура достижимого перегрева стремится к критической температуре. Преимуществом данного метода является сверхмалое время нагрева зонда и пристеночного слоя жидкости до критической температуры. В экспериментах с аминоспиртами длительность греющих импульсов составляла 35 – 850 мкс. Было установлено, что при временах нагрева более 60 мкс исследуемые аминоспирты разлагались в процессе измерения.

Коэффициенты температуропроводности были измерены методом лазерной вспышки с помощью установки LFA-457 Netzsch. Для измерения теплопроводности использовалась установка [4], реализующая THW-метод. В основе метода лежит точное аналитическое решение для бесконечного линейного источника тепла, действующего в однородной сплошной среде. В качестве источника тепла использовался нагреваемый электрическим током платиновый зонд диаметром 20 мкм, длиной 4 см. Важным требованием, вытекающим из полученного аналитического решения, является постоянство линейной плотности теплового потока. Это условие достигнуто в результате разработки и применения регулятора, который обеспечивает поддержание установленного значения мощности с погрешностью не более 0.05%.

Получены уравнения, описывающие зависимость теплопроводности и температуропроводности от температуры, которые вместе с литературными данными по плотности [5] использовались для оценки изобарной теплоемкости исследуемых веществ.

Экспериментальные данные о критических параметрах сравнивались с результатами расчетов аддитивно-групповыми методами Марреро-Гани, Вилсона-Джасперсона, Хуккерикара и др. [6, 7] и использовались для оценки теплофизических свойств исследуемых аминоспиртов с помощью теории термодинамического подобия.

В опытах использовались образцы веществ с чистотой не менее 99 мол. %. Относительные расширенные неопределенности при доверительной вероятности 0.95 составляют: $U_r(T_c) = 0.015$, $U_r(p_c) = 0.04$, $U_r(\lambda) = 0.03$ и $U_r(a) = 0.05$.

Список литературы:

1. Huang et al. An Aprotic Polar Solvent, Diglyme, Combined with Monoethanolamine to Form CO2 Capture Material: Solubility Measurement, Model Correlation, and Effect Evaluation // Ind. Eng. Chem. Res. 2015, V. 54, P. 3430-3437.
2. Teja A.S., Rosenthal D.J. The critical pressures and temperatures of ten substances using a low residence time flow apparatus Experimental Results for Phase Equilibria and Pure Component Properties. DIPPR Data Ser. No.1. 1991, V.1, P.96.
3. Никитин Е.Д., Павлов П.А. Методика ГСССД МЭ 163-2010. Методика экспериментального определения критической температуры и критического давления индивидуальных веществ. – М.: ФГУП «Стандартинформ» 2010.
4. Rutin S.B., Galkin D.A., Skripov P.V. Returning to classic conditions of THW-technique: A device for theconstant heating power mode // Int. J. Heat Mass Trans-fer. 2017. Vol. 115, P. 769-773.
5. Álvarez E., Cerdeira F., Gómez-Diaz D., Navaza J. Density, Speed of Sound, Isentropic Compressibility, and Excess Volume of (Monoethanolamine + 2-Amino-2-methyl-1-propanol), (Monoethanolamine + Triethanolamine), and (Monoethanolamine + N-Methyldiethanolamine) at Temperatures from (293.15 to 323.15) K // J. Chem. Eng. Data. 2010, V.55, P. 994–999.
6. Poling B.E., Prausnitz J.M., O'Connel J.P. The Properties of Gases and Liquids. New York: McGraw-Hill, 2000.
7. Hukkerikar A. S., Sarup B., Ten Kate A., Abildskov J., Sin G., Gani R. Group-contribution+ (GC+) based estimation of properties of pure components: improved property estimation and uncertainty analysis // Fluid Phase Equilib. 2012. Vol. 521. P. 25–43.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00723, https://rscf.ru/project/23-29-00723/

УДК 536.7

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ЖИДКОЙ И ГАЗОВОЙ ФАЗ МЕДИ ПРИ ВЫСОКИХ ПЛОТНОСТЯХ ЭНЕРГИИ

Боярских К.А.[1,2], Хищенко К.В.[1,2,3]

[1] Объединенный институт высоких температур РАН,
125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2
[2] Московский физико-технический институт,
141701, Россия, Долгопрудный, Институтский пер., 9
[3] Южно-Уральский государственный университет,
454080, Россия, Челябинск, проспект Ленина, 76

Уравнение состояния дает возможность находить термодинамические характеристики вещества при различных внешних условиях, а также проводить гидродинамическое моделирование физических процессов, сопряженных с получением высоких давлений и температур.

Настоящая работа посвящена описанию термодинамики меди при высоких давлениях и температурах. Представлено уравнение состояния жидкой и газовой фаз этого металла на основе простой модели термодинамики. Установлены границы фазового перехода жидкость–пар и проведено сравнение с имеющейся экспериментальной информацией. Показано, что рассматриваемое простое уравнение состояния позволяет получить хорошее количественное описание термодинамических свойств жидкости и пара. Получено согласие с данными по теплоте испарения, давлению насыщенных паров, разности энтропий фаз и температурной зависимости плотности жидкой фазы при постоянном давлении.

По разработанному уравнению состояния рассчитаны также ударные адиабаты и изоэнтропы разгрузки образцов меди различной начальной плотности. Результаты расчетов сопоставлены с имеющимися для этого металла данными экспериментов с волнами ударного сжатия и изоэнтропического расширения.

Представленное уравнение состояния может быть использовано в численном моделировании процессов при высоких плотностях энергии.

E-mail: boyarskikh.ka@phystech.edu

УДК 621.01

БЛОКИРОВКА КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛОВОГО ПОТОКА ЗА СЧЕТ ВДУВА ГАЗА В ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ

Ивашиненко М.О.[1], Борисенко И.А.[1], Нетелев А.В.[1]

[1] Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),

125993 Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4

Существуют различные подходы обеспечения теплового режима спускаемого аппарата при движении в плотных слоях атмосферы. Один из таких подходов - это теплозащита, выполненная из материала с проницаемой структурой, через которую в пограничный слой фильтруется газ-охладитель. Таким образом, пограничный слой увеличивается в размерах, блокируя часть поступающего конвективного теплового потока.

Тепловая защита с пористым охлаждением весьма эффективна за счет того, что часть тепла газодинамически блокируется, а часть тепла воспринимается за счет теплоемкости охладителя.

При проектировании систем на основе пористой тепловой защиты необходимо оценить количественные характеристики эффективности процесса вдува газа в пограничный слой. В работе представлен метод определения теплового эффекта от вдува газа-охладителя в пограничный слой через пористую структуру материала тепловой защиты.

Разработанный метод основан на решении обратной задачи для системы уравнений тепло- и массопереноса в пористой структуре.

Для описанной выше задачи рассматривается одномерный процесс теплообмена в тепловой защите толщиной L в интервале времени $\tau \in (0, \tau_m]$. Математическая модель анализируемого процесса будет иметь следующий вид:

$$c\left(T(x,\tau)\right)\frac{dT(x,\tau)}{d\tau} = \frac{d}{dx}\left(\lambda\left(T(x,\tau)\right)\frac{dT(x,\tau)}{dx}\right) + Q(T)\frac{dT(x,\tau)}{dx} \quad (1)$$

Где $Q(T) = c_g G_g$; c_g - теплоемкость газа. G_g - массовый расход газообразных продуктов.

Массовый расход газа через проницаемую стенку будет равен

$$G_g = \Pi \rho_g v_g \quad (2)$$

Где ρ_g - плотность газа; v_g - это скорость газообразных продуктов, Π -пористость.

Обратная задача теплопроводности относится к классу некорректных задач. Решение такой системы происходит с применением численных методов. Одним из наиболее эффективных методов решения является метод итерационной регуляризации, который будет применен в данной работе.[3,4]

Важнейшая и необходимая часть решения обратных задач теплообмена итерационным алгоритмом заключается в вычислении градиента функционала невязки (3).

$$J = \sum_{m=1}^{M} \frac{1}{2} \int_0^{\tau_m} \left(T(X_m,\tau) - f_m^{эксп}(\tau)\right)^2 d\tau \quad (3)$$

На границах данной стенки задаются граничные условия второго рода. На поверхности защиты со стороны теплового потока граничное условие имеет следующий вид:

$$-\lambda\left(T(0,\tau)\right)\frac{dT(0,\tau)}{dx} = q_w \quad (4)$$

Тепловой поток, идущий на прогрев материала, будет выглядеть следующим образом [1,2]:

$$q_w = q_k - \gamma G_w q_k \quad (5)$$

Где γ - это массовый секундный расход газа, который поступает в пограничный слой через единицу площади проницаемой стенки, в свою очередь являющимся определяющим параметром эффекта вдува.

При этом прямое определение величин, входящих в граничное условие на нагреваемой поверхности с учетом вдува газа, весьма затруднено. Но имеется возможность отдельно получить необходимую информацию по тепловому нагружению без учета вдува газа, как было определено в работе[5]. А также тепловой поток, учитывающий вдув газа, предполагается экспериментально измерить. Схема планируемого эксперимента (см. рис.1). Соответственно, зная эти величины, по соотношению (5) можно определить тепловой поток, идущий на прогрев материала.

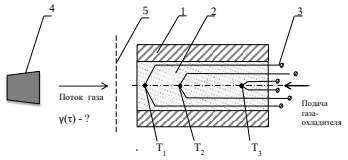


Рисунок 2. Схема расположения термопар T1, T2, T3. 1 – корпус датчика, 2 - пористый материал. 3- выводы термопар, 4- тепловизионная камера, 5- пограничный слой

Список литературы:

1. Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. Тепловая защита, М.: Энергия, 1976, 392 с.
2. Никитин П.В. Тепловая защита. - М: Изд-во МАИ 2005
3. Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Румянцев С.В. Экстремальные методы решения некорректных задач и их приложения к обратным задачам теплообмена, М.: Наука, 1988,- 288 с
4. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Численные методы решения обратных задач математической физики. — М.: Издательство ЛКИ, 2009. — 480 с.
5. Ревизников Д.Л., Неверова Д.А., Ненарокомов А.В., Моржухина А.В. Identification of the Gas Properties by Measurements of the Absorbed Heat Flux Journal of Engineering Thermophysics, Vol. 31, No. 2, pp. 248–260 (год публикации - 2022)

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ №23-19-00764

УДК 621.01

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА АККОМОДАЦИИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЛОБОВОГО ТОРМОЗНОГО ЭКРАНА С НАБЕГАЮЩИМ ПОТОКОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМА ГЕНЕТИЧЕСКОГО ПОИСКА

И.А. Борисенко[1], А.В. Нетелев[1], М.О. Ивашиненко[1], А.В. Моржухина[1], М.О. Салосина[1]

[1]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

125993 Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4

В настоящее время проектируется множество перспективных исследовательских миссий на планеты имеющие атмосферы, одной из таких миссий, например, является программа ЭкзоМарс, где один из основных этапов – доставка спускаемого аппарата на поверхность планеты. При реализации таких проектов, возникает необходимость четкого понимания распределения физических свойств атмосферы на всех высотах небесных тел для проведения корректного расчета параметров спускаемого аппарата. Наличие такой информации позволит увеличить точность математических моделей, описывающих взаимодействие спускаемого аппарата с набегающим газовым потоком, позволит более качественно проводить оценку тенденций развития атмосферных явлений и глобальных планетарных процессов, а также поможет в решении многих других научно-прикладных задач. Прямые измерения свойств атмосферы датчиками непосредственно при спуске аппарата в атмосфере подчас невозможны или сопряжены с большими техническими сложностями реализации подобных измерительных систем. В случае отсутствия необходимых данных они могут быть определены по информации о тепловом состоянии лобового тормозного экрана из совместного решения внешней и внутренней задачи теплопереноса.

Тепловое состояние системы (пограничный слой - лобовой тормозной экран) будет описываться совместным решением внешней и внутренней задач теплопереноса.

$$C(T)\frac{\partial T}{\partial \tau}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right],\ x\in(0,L),\tau\in(0,\tau_m] \quad (1)$$

$$-\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x}_{x=0}=q_w(T)-q_r(T), \quad (2)$$

$$\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x}_{x=L}=a_e P_\infty\left(\frac{RT_\infty}{2\pi\mu}\right)^{0.5}\left[\left(S^2+\frac{k}{k-1}-\frac{1}{2}\frac{(k+1)}{(k-1)}\frac{T_w}{T_\infty}\right)\chi(S_\theta)-0.5\exp\left(-S_\theta^2\right)\right] \quad (3)$$

$$T(x,\tau_0)=T_0(x) \quad (4)$$

Расчет коэффициента аккомодации будет являться классической обратной задачей. В силу некорректности обратных задач для ее решения применяются специальные методы, позволяющие получить устойчивое решение [1,2,3,4]. При решении задачи в описанной постановке минимизируется функционал расчетных и измеренных температур:

$$J(a_e)=\frac{1}{2}\sum_{m=1}^{M}\int_0^{\tau_m}\left[T(x_m,\tau)-f_m(\tau)\right]^2 d\tau \quad (5)$$

Для поиска решения в представленной работе будет использоваться алгоритм генетической оптимизации. Он предусматривает наличие четырех основных этапов расчета: выбор начального приближения решения (исходной популяции, которая будет определять область поиска решений, а также будет являться «родителями» первого поколения), скрещивание «родителей» с образованием новых эволюционных решений («потомков»), мутация одного или нескольких «потомков», выбор членов новой популяции (которые будут являться родителями следующего поколения) [5,6].

В данной работе представлен вариант адаптации этих четырех этапов к решению задачи поиска коэффициентов теплофизических характеристик задачи (1)-(4).

В генетическом алгоритме поиск решения производится среди целого дискретного множества решений. Поэтому, прежде чем приступить к назначению популяции родителей, необходимо определиться с точностью решения и привести искомые характеристики к размерностям, позволяющим записать их в виде бинарного кода.

В задаче (1)-(4) в качестве начального приближения задаются значения коэффициента аккомодации $a_в$. По аналогии с биологическими системами, одно такое решение является «особью», а их совокупность – «популяцией». Суммарное количество особей в популяции должно быть больше двух для того, чтобы обеспечить эволюционный процесс. Представленные выше шаги решения задачи с использованием метода генетического повторяются до минимизации функционала расчетных и измеренных температур к требуемой величине функционала (5).

Список литературы:

1. Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Румянцев С.В. Экстремальные методы решения некорректных задач и их приложения к обратным задачам теплообмена, М.: Наука, 1988, - 288с.
2. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Численные методы решения обратных задач математической физики. — М.: Издательство ЛКИ, 2009. — 480 с
3. Резник С.В., Денисов О.В., Просунцов П.В., Денисова Л.В., Бондалетов Д.Н., Петров Н.М. Отработка методики исследования коэффициента теплопроводности анизотропных композитов. В сборнике: Проблемы управления и моделирования в сложных системах.Труды XXI Международной конференции. В 2-х томах. Под редакцией С.А. Никитова, Д.Е. Быкова, С.Ю. Боровика, Ю.Э. Плешивцевой. 2019. С. 443-446.
4. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1986, 288с.
5. Chambers Lance D. The Practical Handbook of Genetic Algorithms. Chapman and Hall/CRC, Second Edition, 2000, 544 pages.
6. Панченко Т. В. Генетические алгоритмы, -- Астрахань: -- Издательский дом «Астраханский университет», 2007. – 87с.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ №23-19-00764

УДК 536.2:537.533.2

ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЕТАЛЕЙ В ПОЛЕ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ УСКОРЕНИЙ

Лепешкин А.Р.[1,2]

[1]Московский авиационный институт «НИУ», 125993, Россия, Москва, Волоколамское шоссе, 4,
[2]Национальный исследовательский университет «МЭИ», 111250, Россия, Москва,
ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1.

Исследования теплопроводности металлических материалов вращающихся турбинных деталей в поле действия центробежных ускорений и сил имеют важное значение для авиационной техники [1-3].

В оценке теплового состояния вращающихся деталей (лопаток) турбин используются характеристики теплопроводности, которые были получены в стационарных условиях земного тяготения на ненагруженных металлических образцах. В реальных условиях рабочие лопатки и диски турбин нагружены растягивающими центробежными силами и работают при центробежныхускорениях до 10000÷40000 тысяч g и изменение теплопроводности металлических материалов в этих условиях можно ожидать значимым. Влияние сжимающих сил на теплопроводность металлических сплавов ранее исследовалось, например, в [4]. Исследования влияния растягивающих сил на теплопроводность металлических материалов ранее не проводились. В [5, 6] приводятся сведения об электронно-инерционном эффекте, которое опытным путем было установлено. В указанных опытах подтверждается, что ускорения оказывают влияние на перемещение свободных электронов в металле, в частности, при торможении. Необходимо отметить, что любые виды ускорений: линейные, центробежные и виброускорения влияют на теплопроводность металлических материалов [1-3], т.е. на перенос тепла свободными электронами в металле. Ранее проводились исследования влияния центробежных ускорений на температуропроводность металлических теплоизолированных проволок (теплопроводников) в радиальном направлении [1].

В данной работе предложена методика определения теплопроводности металлов в радиальном и окружном направлениях в поле действия центробежных ускорений и сил на разгонной установке с испытательной вакуумной камерой. В отверстии полотна диска (из нержавеющей стали) вблизи его ободной части был установлен мини-электронагреватель и термопары на одинаковом расстоянии от отверстия. Кроме того, теплоизолированный электронагреватель и данные провода дополнительно закреплялись на полотне диска тонкой пластиной, привариваемой специальной сваркой от воздействия центростремительных нагрузок на максимальных частотах вращения. Внутри испытательной вакуумной установки стенда устанавливался исследуемый модельный диск со связкой изолированных проводов.

Испытания проводились в вакуумной испытательной установке на разгонном стенде, имеющем автоматизированную систему управления и контроля частотой вращения электродвигателя. Наблюдения за температурами в радиальном и окружном направлениях в указанных точках вращающегося диска с мини-электронагревателем производились с помощью автоматизированной информационно-измерительной системы. Анализ измерений температур осуществлялся по специальной компьютерной программе. Для электропитания электронагревателя использовался стабилизированный источник питания.

Из анализа результатов экспериментальных исследований следует, что скорости нагрева материала диска на частотах вращения 2500 и 5500 об/мин возрастают в 2 и 2.8 раза соответственно по сравнению со стационарным состоянием без вращения. Причем, в радиальном направлении скорость нагрева возрастает больше, чем в окружном направлении. Полученные экспериментальные данные подтверждают гипотезу автора об эффекте закрученного движения (потока) свободных электронов в данном случае. В исследуемом явлении теплопроводности присутствуют две составляющие: от действия центробежного ускорения и растягивающей центробежной силы. На основе полученных экспериментальных данных о влиянии растяжения вторая составляющая мала и составляет несколько процентов. Таким образом, указанный рост теплопроводности существенно связан с увеличением электронной проводимости в металле при воздействии центробежных ускорений. Полученные результаты имеют важное практическое значение для расчета и оценки теплового состояния высокотемпературных деталей (лопаток турбин, покрытий и др.), работающих в поле центробежных ускорений и сил в авиадвигателестроении, энергетике и других отраслях машиностроения.

Список литературы:

1. Lepeshkin A.R. Technique of studying thermal diffusivity of metallics in different directions in a field of centrifugal accelerations and forces // Journal of engineering thermophysics. 2017. V. 26. No 1. p. 10-16.
2. Лепешкин А.Р. Исследование температуропроводности металлов с учетом инерции электронов в поле центробежных ускорений // Сборник трудов конференции “Актуальные проблемы физики“. 11-15 ноября. М.: ФИАН. 2012. – С. 65-66.
3. Лепешкин А.Р. Способ и установка для определения теплофизических характеристик твердых материалов в поле действия центробежных сил / Патент 2235982 Р.Ф., опубл. 20.04.2011, Бюл. № 11.
4. Эмиров С.Н., Булаева Н.М., Рамазанова Э.Н. Влияние давления и температуры на теплопроводность моно- и поликристаллических образцов антимонида галлия // Труды XII Российской конференции по теплофизическим свойствам веществ. М.: 2008. – С. 306.
5. Гинзбург В.Л., Коган Ш.М. Об электронно-инерционных опытах // ЖЭТФ, 1972. – Т. 61, вып. 3(9). – С. 1177-1180.
6. Tolman R., Stewart T. The electromotive force produced by the acceleration of metals // Phys. Rev. 1916. -Vol. 8, No. 2. - P. 97-116.

УДК 536.2:537.533.2

ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ВЛИЯНИИ НИЗКИХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ

Лепешкин А.Р.[1,2]

[1]Московский авиационный институт «НИУ», 125993, Россия, Москва, Волоколамское шоссе, 4
[2]Национальный исследовательский университет «МЭИ», 111250, Россия, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1.

Исследования теплопроводности металлических материалов турбинных деталей при влиянии низких частот механических колебаний является сложной проблемой, решение которой имеет актуальное значение для авиационной техники, энергетики и других отраслей промышленности.

Развитие авиадвигателей устойчиво идёт по пути повышения температуры газа перед турбиной. Однако, разработка и совершенствование двигателей пятого поколения, как в России, так и за рубежом наталкивается на серьёзные трудности при освоении более высоких температур. Тепловые расчёты ГТД и их элементов выполняются по классическим моделям и во многих случаях плохо согласуются с экспериментом. Максимальные измеренные температуры на реальных объектах значительно превышают расчетные величины, что не обеспечивает необходимую прочность, надёжность и ресурс деталей перспективных авиадвигателей. При оценке температурного состояния деталей ротора турбины используются коэффициенты теп-лопроводности, которые были получены в стацио-нарных условиях земного тяготения (g=1) на ненагруженных образцах.

Лопатки турбин авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) работают при значительных механических колебаниях и виброускорениях, достигающих несколько тысяч g, и изменение теплопроводности металлических материалов в этих условиях можно ожидать значимым. Кроме низких частот механических колебаний на детали турбин ГТД действуют центробежные ускорения и растягивающие центробежные силы [1]. Необходимо отметить, что любые виды ускорений: линейные, центробежные и виброускорения влияют на теплопроводность металлических материалов [1-3]. Ранее проводились исследования влияния центробежных ускорений и сил на теплопроводности металлов приведены в [4, 5]. В [6, 7] приводятся сведения по электронному явлению в металлах, которое было установлено опытным путем. В данных опытах подтверждается, что ускорения оказывают влияние на перемещение свободных электронов в металлах, в частности, при торможении [6, 7].

В данной работе приведена методика определения теплопроводности разных металлических материалов в поле действия низких частот механических колебаний с учетом гипотезы автора о поступательно-вихревом движении свободных электронов в металле. Разработано устройство для определения указанных характеристик на виброустановке. Методика исследований предусматривала закрепление на конце балки образцов из тонких хромелевого и медного проводов и небольшого электронагревателя. На концах образцов и перед электронагревателем приваривались термопары. Образцы и электронагреватель были теплоизолированы от балки, установленной на виброустановке.

Приведены результаты исследований нестационарного нагрева образцов в поле действия низкочастотных механических колебаний при разных амплитудах (размахах) колебаний на частоте 110 Гц на виброустановке. По полученным результатам представлены оценки теплопроводности образцов. Из анализа результатов экспериментальных исследований нестационарного теплового состояния и скоростей нагрева образцов следует, что теплопроводность образца из никелевого сплава при виброускорении 100 g увеличивается в 1.5 раза по сравнению со статическим состоянием и для медного – в 1.3 раза, при этом время передачи тепла от начала образца к его концу уменьшается примерно также. Такое повышение теплопроводности связано с увеличением электронной проводимости в металле за счет перемещения теплоносителей (имеющих массу) - свободных электронов при воздействии низкочастотных механических колебаний. Полученные результаты имеют важное практическое значение для расчета и оценки теплового состояния деталей авиационных двигателей и других энергетических турбомашин, работающих при значительных низкочастотных механических колебаний и других эксплуатационных нагрузках.

Список литературы:

1. Lepeshkin A.R. Technique of studying thermal diffusivity of metallics in different directions in a field of centrifugal accelerations and forces // Journal of engineering thermophysics. 2017. v. 26. № 1. p. 10-16.
2. Лепешкин А.Р. Исследование температуропроводности металлов при виброускорениях // Сб. тр. V Всероссийской конференции по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики. М.: ФИАН. 2013. С. 98.
3. Лепешкин А.Р. Тепло, еще теплее…Эпоха открытий еще не закрыта. ФИАН. 2014. С. 1-4.
4. Лепешкин А.Р. Способ и установка для определения теплофизических характеристик твердых материалов в поле действия центробежных сил / Патент 2235982 РФ, опубл. 20.04.2011, Бюл. № 11.
5. Лепешкин А.Р. Температуропровоность материалов в поле действия центробежных ускорений и сил // Труды пятой Российской национальной конференции по теплообмену. В 8 томах (25-29 октября 2010 г., Москва). Т. 1. Общие проблемные доклады. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010.
6. Гинзбург В.Л., Коган Ш.М. Об электронно-инерционных опытах // ЖЭТФ, 1972. – Т. 61, вып. 3(9). С. 1177-1180.
7. Tolman R., Stewart T. The electromotive force produced by the acceleration of metals // Phys. Rev. 1916. -Vol. 8, No. 2. P. 97-116.

УДК 532.632

ТЕПЛОЕМКОСТЬ РЫБЬЕГО ЖИРА ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ДАВЛЕНИЯХ

Мазанов С.В.[1], Зарипов З.И.[1], Накипов Р.Р.[1], Аетов А.У.[1]

[1] ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», 420015, Россия, Казань, ул. К. Маркса, 68

Проведены экспериментальные исследования по определению значений изобарной теплоемкости рыбьего жира в зависимости от температуры и давления в диапазоне температур от 298,15 до 473,15 К и при давлениях от 0,098 до 39,2 МПа. Образец рыбьего жира OMEGA-3 «950» был предоставлен компанией SOLGAR INC (США) (n_D^{25} = 1,4792, ρ^{25} = 904,8 кг/м^3), чистотой 99,0 %, состоящий из эйкозапентаеновой кислоты (53,05 % масс) и докозагексаеновой кислоты (39,79 % масс). Образец был использован без дальнейшей очистки. Измерения изобарной теплоемкости рыбьего жира были выполнены с использованием сканирующего калориметра (ИТ-с-400) с системой автоматического сбора данных. Достоверность и точность данных измеренной теплоемкости исследуемого образца, адекватности работы установки подтверждены измерениями теплоемкости жидкостей с хорошо известными, надежными и доступными экспериментальными данными [1, 2]. Результаты измерений представлены на рис. 1, 2.

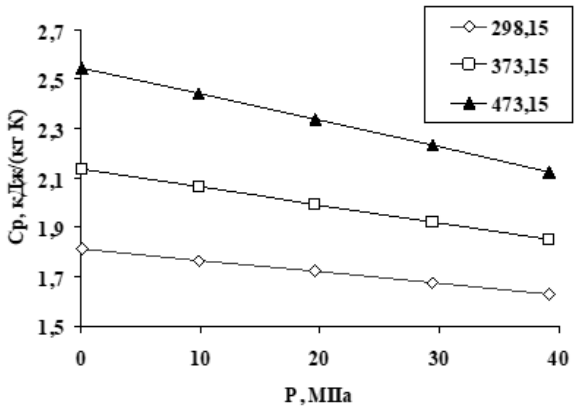


Рис. 1. Зависимость изобарной теплоемкости рыбьего жира от давления p, МПа: 1 – 298,15 К; 2 – 373,15 К; 3 – 473,15 К

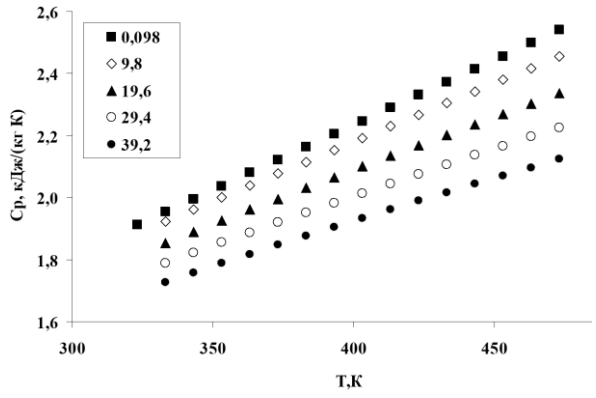


Рис. 2. Зависимость изобарной теплоемкости рыбьего жира от температуры при давлениях p, МПа: 1 – 0,098; 2 – 9,8; 3 – 19,6; 4 – 29,4; 5 – 39,2

Экспериментальные данные изобарной теплоемкости рыбьего жира от температуры и давления аппроксимированы уравнением вида:

$$c_p(p,T) = a_0 + a_1T + a_2P + a_3PT + a_4T^2 + a_5P^2$$

где $c_p(p,T)$ – изобарная теплоемкость при заданных P и T, кДж/(кг·К); a_i (i = 0.5) - подгоночные параметры.

При атмосферном давлении отклонения между рассчитанными по корреляционному уравнению и текущие измеренные данные (рис. 1, 2) находятся в пределах AAD = 0,22 % (среднеквадратичное отклонение St. Dev = 0,28 % и максимальное отклонение Max. Dev = 0,39 %).

Корреляционное уравнение было использовано для сравнения настоящих данных по теплоемкости для рыбьего жира с расчетными по методу соответственных состояний [3, 4]. Статистика отклонений сведена в таблицу 1.

Таблица 1. Сводка стандартных отклонений (St.Err.), средних абсолютных относительных отклонениях (AAD) и максимальных относительных отклонений (MAAD) по отношению к корреляционному уравнению при атмосферном давлении

Авторы	St. Err, %	AAD, %	MADD, %
[3]	1,94	6,36	4,17
[4]	2,22	2,6	3,86
Настоящая работа	0,15	0,11	0,19

Средняя погрешность расчета теплоемкости рыбьего жира по [4] при давлении p=0,098 МПа в интервале температур от 298,15 до 423,15 К лежит в пределах ± 5 %, максимальная погрешность превышает ± 15 %, что намного выше соответствующей оценки погрешности. При давлениях выше атмосферного с ростом давления до 39,2 МПа отклонения расчетных данных от корреляционного уравнения возрастают до 17 %. Увеличение температуры приводит к снижению погрешности расчета.

Список литературы:

1. Zaripov Z.I., Aetov A.U., Nakipov R.R., Khairutdinov V.F., Gumerov F.M., Abdulagatov I.M. Isobaric heat capacity of 1,2-propanediol at high temperatures and high pressures // J. Mol. Liquids. 2020. V. 307. P. 1-9.
2. Zaripov Z.I., Aetov A.U., Nakipov R.R., Khairutdinov V.F., Gumerov F.M., Abdulagatov I.M. Isobaric heat capacity of the binary liquid (water + 1,2–propanediol) mixtures at high-temperatures and high-pressures // J. Chem. Thermodynamics. 2021. V. 152. P. 1-15.
3. Свойства газов и жидкостей / Р. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд. Л.: Химия, 1982. 591 с.
4. Прогнозирование теплофизических свойств жидкостей и газов / Л.П. Филиппов. М.: Энергоатомиздат, 1988. 168 с.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №23-79-10304, https://rscf.ru/project/23-79-10304/).

УДК 533.9

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В МОДЕЛИРОВАНИИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ МАГНИТНО-ИНЕРЦИАЛЬНОГО СИНТЕЗА

Кузенов В.В., Рыжков С.В.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
105005, Россия, Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Радиационно-магнито-газодинамические процессы при взаимодействии мощных потоков энергии с веществом характеризуются наличием магнитного поля, причем начальное (затравочное) магнитное поле сжимается пучками и лазерами вместе с самой плазменной мишенью, достигая значений нескольких мега тесла (МТл) [1-5]. Получаемые сильные и даже сверхсильные магнитные поля позволяют дольше удерживать продукты синтеза и тем самым дают возможность прореагировать большему количеству частиц топлива и получить высокий коэффициент выгорания топлива.

Комбинированная схема инерционного синтеза с замагниченным лайнером представляет собой концепцию магнитно-инерциального синтеза, основанную на замагничивании топлива, предварительном нагреве лазером и магнитной имплозии для создания условий синтеза. Именно для таких условий необходимо моделирование газодинамики и теплофизики при влиянии сильных энергетических потоков на вещество во внешнем магнитном поле.

Возможность создания регулируемых электрических полей в плазме открывает широкие возможности применения плазменных технологий. Изучение потенциальных преимуществ использования магнитных полей в экспериментах по термоядерному синтезу с инерционным удержанием привело к созданию экспериментальных платформ, таких как подход к инерционному синтезу с замагниченным лайнером на Z-машине или его лазерному эквиваленту. Реализация этих платформ на лазерных установках масштаба мегаджоуля имеет решающее значение для достижения самоподдерживающегося ядерного синтеза.

Магнитно-инерционное удержание горячей плазмы подразумевает применение инновационных установок в достаточно сильном магнитном поле, которое уменьшает теплоперенос в плазме и увеличивает температуру электронов на оси конфигурации.

Магнитно-инерциальный синтез, управляемый плазменной струей, включает слияние плазменных струй с высоким числом Маха в сферически сходящейся геометрии с образованием взрывающегося плазменного лайнера. Установки магнитно-инерциального термоядерного синтеза представляют большой практический интерес и для экспериментаторов, так как дают возможность проводить весь спектр диагностики, включающий распределение температур, плотностей, неустойчивости, микроволновую диагностику. Такая более схема удобна для наблюдения за горением (расположение портов на стенках камеры и доступ к плазме), так как в системах с металлическим лайнером это сделать невозможно.

Предпосылки эффективного использования схем с мощными источниками излучения обусловлены успехами экспериментов, а теоретические и расчетные исследования базируются на весьма упрощенных методиках. Поэтому необходимы новые, более детальные физические модели и многоуровневые вычислительные модели, в том числе развитие существующих моделей учитывающих пространственную структуру струй, реальные уравнения состояния, теплообмена излучением и другие радиационно-плазмодинамические процессы. Главная особенность рассматриваемой задачи заключается в возможности создания на основе выполненных исследований экспериментальных образцов портативных источников излучения и импульсных струй плазмы с рекордными характеристиками для использования для объектов атомной энергетики, повышение эффективности добычи углеводородного сырья и других сфер [6-10].

В работе представлены результаты численного моделирования газодинамических и теплофизических процессов при влиянии сильных энергетических потоков на вещество во внешнем магнитном поле.

Проводимые исследования направлены на решение важной научно-технической задачи, связанной с разработкой перспективных систем импульсного магнитно-инерциального синтеза и различных технологических применений. Предлагается также рассмотреть новые варианты конических и цилиндрических термоядерных мишеней, сжимаемых и нагреваемых под действием интенсивных потоков энергии (лазерные лучи и плазменные струи) в сильном магнитном поле.

Результаты получены в рамках выполнения госзадания Минобрнауки России № FSFN-2024-0011.

Список литературы:

1. Гаранин С.Г., Ивановский А.В., Куликов С.М., Мамышев В.И., Певный С.Н., Рогачев В.Г. Инерционный термоядерный синтез с применением взрывомагнитных генераторов // Физика плазмы. 2022. Т. 48. С. 131-140.
2. Yager-Elorriaga D.A. et al. An overview of magneto-inertial fusion on the Z machine at Sandia National Laboratories // Nucl. Fusion. 2022. V. 62. P. 042015.
3. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Numerical Simulation of Pulsed Jets of a High-Current Pulsed Surface Discharge // Computational Thermal Sciences. 2021. V. 13. P. 45-56.
4. Рыжков С.В., Чирков А.Ю. Системы альтернативной термоядерной энергетики. М.: Физматлит, 2017. 200 с.
5. Ryzhkov S.V. Magneto-Inertial Fusion and Powerful Plasma Installations (A Review) // Applied Sciences. 2023. V. 13 (21). P. 6658.
6. Кузенов В.В., Рыжков С.В. Численное моделирование взаимодействия мишени магнитно-инерциального термоядерного синтеза с плазменным и лазерным драйверами // ТВТ. 2021. Т. 59, № 4. С. 492–501.
7. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Thermophysical Parameter Estimation of a Neutron Source Based on the Action of Broadband Radiation on a Cylindrical Target // Fusion Science and Technology. 2023. V. 79. P. 399-406.
8. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Estimation of the neutron generation in the combined magneto-inertial fusion scheme // Physica Scripta. 2021. V. 96. P. 125613.
9. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Varaksin A.Yu. Computational and experimental modeling in magnetoplasma aerodynamics and high-speed gas and plasma flows (A Review) // Aerospace. 2023. V. 10. P. 662.
10. Самохин А.А., Смирнов В.П., Гавриков А.В., Ворона Н.А. // ЖТФ. 2016. V. 86. P. 127–133.

УДК 536.7

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ СПЛАВА ЖЕЛЕЗО–НИКЕЛЬ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ

Середкин Н.Н., Хищенко К.В.

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

Для анализа физических явлений в условиях высоких давлений и температур важно знать уравнение состояния рассматриваемого вещества. В настоящей работе представлены уравнения состояния двух металлов (железо, никель) и их сплава в рамках простых термодинамических моделей.

Для железа и никеля уравнения состояния строятся на основе термодинамического потенциала свободной энергии как функции от удельного объема и температуры.

Для сплава железо–никель уравнение состояния в предположении теплового и механического равновесия в сплаве (компоненты имеют одинаковую температуру и равное давление) задается на основе термодинамического потенциала энергии Гиббса как функции давления и температуры. В таком представлении удельная внутренняя энергия и удельный объем сплава из N компонентов (величины с индексом $1N$) определяются как суммы соответствующих параметров компонентов (величины с индексом i) с учетом их массовых долей (α_i):

$$E_{1N}(P,T)=\sum_{i=1}^{N}\alpha_i E_i(P,T),$$

$$V_{1N}(P,T)=\sum_{i=1}^{N}\alpha_i V_i(P,T).$$

По построенным уравнениям состояния проведены расчеты ударных адиабат для железа, никеля и сплава железо–никель.

Результаты проведенных расчетов имеют хорошее согласие с данными ударно-волновых экспериментов, имеющимися для рассмотренных материалов, при высоких давлениях и температурах.

E-mail: nikser12@yandex.ru

УДК 536.3+536.42

ТАЯНИЕ МУТНОГО ЛЬДА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИСКУССТВЕННЫМ ИСТОЧНИКОМ ИЗЛУЧЕНИЯ

Слепцов С.Д.[1], Саввинова Н.А.[2]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] Северо-Восточный федеральный университет,
677000, Россия, Якутск, ул. В.Г. Белинского, 58

Большинство полупрозрачных сред в природе имеют различные включения и являются двухфазными, в том числе лед. Лед, и особенно озерный лед, содержат включения в виде пузырьков с поглощающими излучение газами, такими как воздух, природный газ, метан и другие газы. Большинство из этих газов могут являться парниковыми и при таянии высвободиться в окружающую среду, поэтому исследования в этой области являются актуальными. В работах [1 - 2] влиянием поглощения излучения газом в пузырьках во льду пренебрегали, рассматривая полупрозрачную среду, в основном, как светорассеивающую. В [3] представлена математическая модель нагрева и таяния льда в высокогорном озере Нгоринго в Синьцзян-Тибетском плато (КНР). Данная модель показала хорошее согласие с результатом полевых наблюдений и авторы рекомендуют использовать модель для прогнозирования состояния рек, озер и морского льда. Однако в модели не учитывается объемное поглощение излучения различными включениями. Целью данной работы является физико-математическая модель таяния льда с пузырьками, поглощающего излучение газа, с учетом широкого спектра оптических свойств льда и газа.

Постановка задачи аналогична [1] и соответствует условиям, созданным в [4]: в климатической камере с температурой T_∞=273 К на непрозрачной вертикальной подложке из бакелита закреплен слой льда, облучаемый искусственным источником излучения с температурой накала нити 3200 К. Лед представляет собой рассеивающий и поглощающий излучение полупрозрачный материал, содержащий в пузырьках, равномерно распределенных по объему с долей f_V и со средним радиусом r_b, селективно поглощающий излучение модельный газ. Для расчета радиационной части используется модифицированный метод средних потоков, селективность излучения моделируется тремя спектральными полосами поглощения. Для учета селективного поглощения газовой фазы использована аддитивная способность объемного коэффициента поглощения: $\alpha_j=\alpha_{ice,j}+\alpha_{gas,j}$, где j – номер спектральной полосы. Для учета анизотропного рассеяния излучения использован метод транспортного приближения [1 – 3].

Решение задачи радиационно-кондуктивного теплообмена в плоском слое льда проводится в два этапа. На первом этапе рассматривается нагрев плоского слоя льда до достижения правой облучаемой границей температуры таяния. Далее начинается второй этап – таяние льда, в процессе которого температура правой границы постоянно равна температуре плавления, и на этой границе выполняется условие Стефана. Математическая модель задачи плавления льда представляет собой однофазную постановку задачи Стефана. Численно определяются температурные поля, тепловые потоки, скорость таяния. Положение границы раздела фаз и рост температуры на необлучаемой стороне льда определяется из решения краевой задачи.

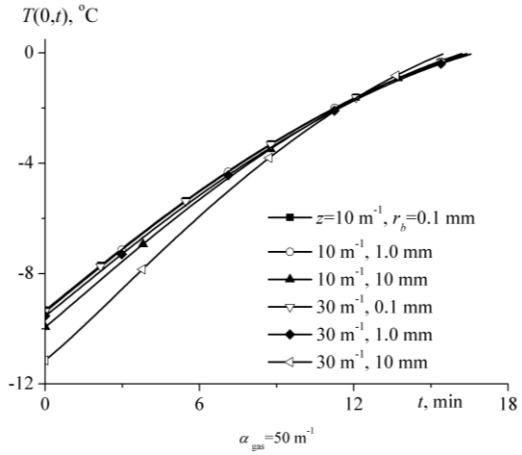


Рис. 1. Темп роста температуры на необлучаемой поверхности льда в процессе его таяния при разных значениях параметров анизотропного рассеяния и при $\alpha_{gas,j}$=50 м$^{-1}$.

Получены численные значения температурных полей и плотности результирующего радиационного потока в слое льда, скорости таяния и роста температуры необлучаемой поверхности льда при разных значениях коэффициента поглощения излучения газами внутри пузырьков и параметров анизотропного рассеяния излучения. Показано сильное влияние рассеяния излучения на изменение температуры необлучаемой поверхности льда. При этом скорость таяния остается постоянным.

Список литературы:

1. Слепцов С.Д., Саввинова Н.А. Моделирование таяния льда на вертикальной подложке // ТиА, 2022. Т. 29, №4. С. 665-670.
2. Dombrovsky L.A., Kokhanovsky A.A. Solar heating of ice sheets containing gas bubbles // J. Quantitative Spectroscopy Radiative Transfer. 2020. Vol. 250. P. 106991.
3. Dombrovsky L.A., Kokhanovsky A.A. Solar heating of ice-covered lake and ice melting // J. Quantitative Spectroscopy Radiative Transfer. 2023. Vol. 294. P. 108391.
4. Seki N., Sugawara M., Fukusaki S. Radiative Melting of Ice Layer Adhering to a Vertical Surface // Wärme- und Stoffübertragung, 1979. Vol. 12. Iss. 2. P. 137-144.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН 121031800219-2

УДК 537.868.3

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Усманов Б.А.[1], Галеев Р.Р.[1], Мусин А.А.[1], Зиннатуллин Р.Р.[1]

[1] Уфимский университет науки и технологий,
450076, Россия, Уфа, ул. Заки Валиди 32

Одним из менее устоявшихся способов увеличения нефтеотдачи является диэлектрический нагрев призабойной зоны пласта. Его эффективное применение осложняется трудностью моделирования распространения электромагнитных (ЭМ) волн в пласте. Это связано с тем, что глубина и характер их распространения в среде зависят не только от диэлектрических свойств среды, но и от свойств самого электромагнитного поля (ЭМП) [1].

Данные обстоятельства значительно усложняют постановку теплофизических задач. В связи с этим, зачастую её значительно упрощают. К примеру, среду можно рассматривать как квазиоднородную, с осреднёнными диэлектрическими свойствами. Тепловое воздействие ЭМП в таком случае определяется по уравнению теплопроводности с распределёнными источниками тепла:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho}\Delta T + \frac{q}{c\rho} \quad (1)$$

$$q = 2\alpha P_0 e^{-2\alpha r} \quad (2)$$

где $c\rho$ - объемная теплоемкость, λ - коэффициент теплопроводности, q - плотность распределенных источников тепла, α - коэффициент поглощения ЭМ волны, P_0 - плотность потока ЭМ энергии, r - расстояние, пройденное волной в среде.

Преимуществом этого подхода является простота в применении и низкая численная нагрузка, но он сравнительно неточен и не учитывает, в частности, неоднородность ЭМП. Вследствие этого, модель необходимо дополнить.

В работе [2] для определения распределённых источников тепла используется формула, напрямую содержащая в себе свойства ЭМ волны:

$$q = \frac{\omega\varepsilon_0\varepsilon' tg\delta}{2}|E_0|^2 \quad (3)$$

где E_0 - напряжённость ЭМП, ε_0 - электрическая постоянная; ε - диэлектрическая проницаемость, $tg\delta$ - тангенс угла диэлектрических потерь, ω - циклическая частота поля.

Совмещение формул (1) и (3) позволяет определить распределение ЭМ волны по данным температурной динамики. Имея данные диэлектрического нагрева вещества с известными диэлектрическими свойствами, можно решить обратную задачу для определения напряжённости ЭМП в точках измерения температуры. Затем, получив зависимости этих значений от пространственных координат, построить распределение поля во всём исследуемом объёме.

В рамках данной работы были проведены эксперименты по нагреву жидкости сверхвысокочастотным (СВЧ) ЭМП на специально разработанной экспериментальной установке. Жидкость помещалась в электрически нейтральную ёмкость, состоящую из множества секций для учёта неоднородности ЭМП. Помимо этого, размер секций и время ЭМ воздействия были выбраны достаточно малыми для того, чтобы можно было пренебречь затуханием ЭМ волны при её прохождении через среду, теплопровдностью внутри секций и между ними, а также зависимостью диэлектрических свойств от температуры, что упростило математическую модель и, соответственно, обратную задачу.

Ёмкость с жидкостью помещалась в волновод, на одном из концов которого располагался источник излучения. Для получения объёмной картины ЭМ воздействие и замер температуры проводились на разных расстояниях от источника. Фактически, мы получали «срезы» распределения ЭМП по длине волновода. Распределение температуры по площади секционной ёмкости после ЭМ воздействия измерялось тепловизором. Квантификация его показаний проводилась путем цифровой обработки изображений.

Полученные значения изменения температуры после ЭМ воздействия были использованы для расчёта значений напряжёности ЭМП в точках по всему объёму волновода. В цилиндрической системе координат наблюдалась циклическая зависимость по каждому направлению, вследствие чего для аппроксимации были выбраны тригонометрические функции. Аппроксимирующие кривые для каждой отдельной координаты были получены при помощи метода Гаусса-Ньютона, затем совмещены в одну объёмную, что дало нам искомое пространственное распределение ЭМП. Валидация полученного результата была произведена сравнением результатов моделирования диэлектрического нагрева керна с соответствующими экспериментальными данными.

Предложенный в данной работе метод позволяет строить объёмную картину распределения ЭМП, что в свою очередь позволяет проводить объёмное моделирование динамики температуры в насыщенной пористой среде под воздействием СВЧ излучения, учитывающее неоднородность ЭМП.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 22–11–20042.

Список литературы:

1. Swechchha Gupta, Ritu Jain, Nidhi Bhargava, Frequency dependence of dielectric properties of varieties of almonds at microwave frequencies, Materials Today: Proceedings, Volume 92, Part 2, 2023, Pages 1514-1517.
2. Математическое моделирование электромагнитного воздействия на нефтематеринские горные породы с учетом фазовых переходов / З. С. Мухаметова, А. А. Мусин, Р. Р. Зиннатуллин, Л. А. Ковалева // Вестник Башкирского университета. – 2021. – Т. 26, № 2. – С. 274-280.

УДК 536.6:669

ЭНТАЛЬПИЯ И ТЕПЛОЕМКОСТЬ СПЛАВОВ Cs–Bi В ЖИДКОМ СОСТОЯНИИ

Хайрулин А.Р.[1], Станкус С.В.[1]

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

Жидкие сплавы щелочных металлов с висмутом относятся к классу так называемых ионно-металлических расплавов. Согласно современным представлениям, из-за значительной разницы в электроотрицательности компонентов, в данных расплавах наряду с металлическим типом связи существует и ионно-ковалентная связь, приводящая к образованию ионных ассоциатов в виде цепочек различной длины из анионов висмута, окруженных катионами щелочного металла, диссоциирующих с ростом температуры [1]. Следствием подобных структурных изменений является аномальное поведение различных теплофизических и электрофизических свойств жидких сплавов данных систем при определенных концентрациях. Так, например, на концентрационной зависимости электросопротивления жидкой системы Cs–Bi наблюдается гигантский максимум в районе 40 ат. % Bi, а температурный коэффициент сопротивления становится отрицательным в интервале 20–50 ат. % Bi. Нетипичное для жидкометаллических систем поведение демонстрируют и термические свойства данной системы – на концентрационной зависимости избыточного молярного объема жидкой системы Cs–Bi имеется широкий минимум в интервале концентраций от 20 до 50 ат. % Bi, а объемный коэффициент теплового расширения достигает максимума при содержании 25 ат. % Bi [2].

Данные по калорическим свойствам жидких сплавов Cs–Bi в литературе отсутствуют (за исключением работ, уже опубликованных нами в рамках данного исследования), что, безусловно, затрудняет дальнейшее развитие теории ионно-металлических расплавов. Цель настоящей работы – обобщение опубликованных нами ранее данных по энтальпии и теплоемкости отдельных сплавов системы Cs–Bi с целью выявления особенностей в их поведении, связанных с предполагаемыми структурными изменениями.

Всего было исследовано 6 сплавов Cs–Bi, содержащих 20, 27,1, 40, 50, 57 и 66,7 ат. % Bi. Подготовка образцов происходила в перчаточном боксе в атмосфере высокочистого аргона. В качестве измерительных ячеек использовались ампулы из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Ампулы с загруженными внутрь образцами герметизировались электродуговой сваркой непосредственно внутри бокса. Измерения энтальпии производились на массивном калориметре смешения с изотермической оболочкой с неопределенностью не более 0,3 % [3]. Теплоемкость рассчитывалась путем дифференцирования сглаженных данных по энтальпии. Измерения энтальпии производились в интервале температур от 430 до 1075 К. Для всех сплавов были определены температуры фазовых переходов, разработаны таблицы справочных данных и рекомендуемые температурные зависимости изученных свойств.

Одним из самых интересных результатов является необычный вид концентрационной зависимости теплоемкости жидкой системы Cs–Bi (см. рис. 1), на которой наблюдается размытый максимум в интервале концентраций от 20 до 50 ат. % Bi с пиком в окрестности 30 ат. % Bi. С использованием данных по энтальпии смешения твердых фаз системы Cs–Bi при 298 К [4], была построена концентрационная зависимость энтальпии смешения для жидкой системы при температуре 1000 К, на которой имеется широкий минимум в том же интервале концентраций, что указывает на сильное химическое взаимодействие между компонентами сплавов.

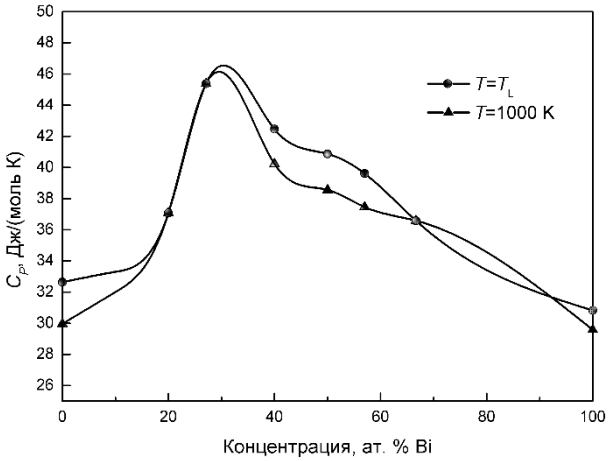


Рис. 1. Концентрационная зависимость теплоемкости жидкой системы Cs–Bi при температуре ликвидуса и при 1000 К.

Полученные данные косвенно подтверждают имеющиеся в литературе предположения о присутствии в жидких сплавах Cs–Bi полианионных комплексов в виде цепочек различной длины из отрицательных ионов висмута, окруженных ионами Cs^+, максимальное содержание которых достигается при определенных стехиометрических концентрациях.

Список литературы:

1. Meijer J.A., van der Lugt W. Resistivity of liquid K–Bi and Cs–Bi alloys // J Phys Condens Mat. 1989. Vol. 1, No. 48. P. 9779–9784.
2. Khairulin R. A., Abdullaev R. N., Stankus S. V. Volume contraction in liquid caesium–bismuth alloys // Phys. Chem. Liq. 2020. Vol. 58, No. 2. P. 143–149.
3. Станкус С.В., Савченко И.В., Яцук О.С. Высокотемпературный калориметр смешения для исследования веществ и материалов в твердом и жидком состояниях // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 4. С. 150–156.
4. Djaballah Y. et al. Thermodynamic description of the Bi–Cs and Bi–Tm system supported by first-principles calculations // CALPHAD. 2015. Vol. 48. P. 72–78.

УДК [536.413+536.631]:669.721.5’669.884

ТЕРМИЧЕСКИЕ И КАЛОРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАГНИЙ-ЛИТИЕВЫХ СПЛАВОВ С МАЛЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ЛИТИЯ

Абдуллаев Р.Н., Хайрулин А.Р., Самошкин Д.А., Козловский Ю.М., Станкус С.В.

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

Магний как машиностроительный материал обладает рядом достоинств, одним из которых является его низкая плотность. Сплавы на основе магния являются одними из самых легких конструкционных и инженерных материалов. Добавка в эти сплавы лития делает их сверхлегкими и перспективными для использования в портативной электронике, автомобильной и аэрокосмической промышленностях и т.д. Кроме этого, увеличение содержания лития приводит к росту пластичности этих сплавов. Наличие надежных экспериментальных данных о физических свойствах магний-литиевых сплавов в широком интервале температур необходимо для адекватного анализа перспектив их применения в качестве сверхлегких конструкционных материалов.

Дилатометрическим методом и методом дифференциальной сканирующей калориметрии выполнены измерения термических и калорических свойств магний-литиевых сплавов, богатых магнием [1] (с содержанием 5, 10 и 17 ат. % Li), в широком интервале температур твердого состояния. Гомогенизация сплавов Mg–Li были проведена в герметичных молибденовых ампулах. Операции по приготовлению сплавов и заполнению молибденовых ячеек проводились в перчаточном боксе с высокочистым аргоном (99,992 об. %), оснащенном аппаратом электрической дуговой сварки и электронными аналитическими весами.

Удельная теплоемкость сплавов исследовалась на экспериментальной установке DSC 404 F1 фирмы NETZSCH в интервале температур 185–782 К. Измерения осуществлялись с использованием тиглей из нержавеющей стали или платиновых тиглей с корундовыми вставками и платиновыми крышками со скоростями нагрева 2 и 10 К/мин в проточной атмосфере аргона особой чистоты (99,999 об.%). Скорость потока аргона в печи калориметра составляла 20 мл/мин. В качестве калибровочного образца использовался сапфир массой 85,3 мг. Оцениваемая погрешность полученных данных по теплоемкости составила 2–3%.

Измерение относительного удлинения и линейного коэффициента теплового расширения сплавов проведено на установке DIL 402 C фирмы NETZSCH в интервале температур 120–645 К, в режиме нагрева со скоростями 2 и 5 К/мин, в атмосфере чистого гелия (99,995 об. %). Оцениваемая погрешность полученных экспериментальных данных по коэффициентам теплового расширения лежит в пределах 1–3%

На основании полученных ранее и в настоящей работе результатов построены температурные и концентрационные зависимости плотности, коэффициентов теплового расширения и теплоемкости магний-литиевых сплавов с содержанием 0–30 ат. % Li. Показано, в частности, что теплоемкость данных сплавов хорошо описывается правилом Коппа-Неймана при температурах выше 260 К. Анализ концентрационных зависимостей коэффициентов теплового расширения (КТР) показал малое изменение КТР сплавов магний-литий в области (Mg)-фазы [1] (см. рис. 1). По нашим сведениям, плотность, тепловое расширение и теплоемкость исследованных сплавов до настоящего времени не измерялись. В связи с этим, полученные в настоящей работе экспериментальные данные являются уникальными и могут быть рекомендованы в качестве справочных.

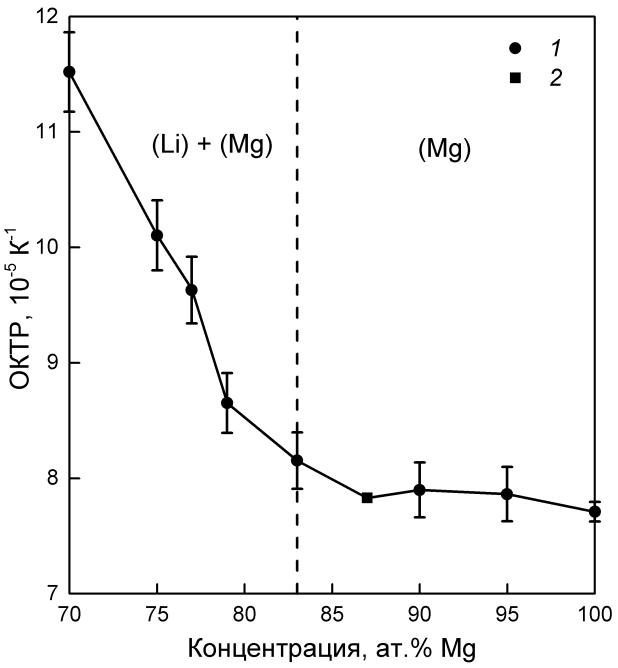


Рис. 1. Концентрационная зависимость объемного коэффициента теплового расширения (ОКТР) сплавов магний-литий при комнатной температуре: 1 – наши данные, 2 – данные [2].

Список литературы:

1. Nayeb-Hashemi A.A., Clark J.B., Pelton A.D. The Li–Mg (lithium-magnesium) system // Bull. alloy phase diagr. 1984. Vol. 5. No. 4. P. 365-374.
2. Rudajevová A., Kúdela S., Staněk M., Lukáč P. Thermal properties of Mg–Li and Mg–Li–Al alloys // Mater. Sci. Technol. 2003. Vol. 19. No. 8. P. 1097-1100.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-79-10025, https://rscf.ru/project/20-79-10025/ .

УДК 536.7

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИСТИРОЛА В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ПЛОТНОСТЕЙ И ТЕМПЕРАТУР

Хищенко К.В.

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

Описание термодинамических свойств различных материалов представляет интерес для гидродинамического моделирования физических процессов при интенсивных импульсных воздействиях. Примерами таких процессов могут служить высокоскоростное соударение тел, взаимодействие интенсивного лазерного излучения или мощных корпускулярных потоков с твердотельными мишенями. При этом в веществе на стадии энерговклада возникают состояния с высокой удельной внутренней энергией, высоким давлением и (или) высокой температурой. На стадии разгрузки становится возможным адиабатическое расширение вещества.

Для численного моделирования образующихся в таких процессах течений необходимо знать уравнение состояния среды во всей области реализуемых термодинамических параметров. Построение уравнения состояния вещества в широком диапазоне плотностей и температур традиционно [1] осуществляется в рамках полуэмпирического подхода, в котором функциональная зависимость термодинамического потенциала (свободной энергии) формулируется согласно теоретическим представлениям, а для определения значений констант в этой зависимости требуется хорошее согласие с имеющимися экспериментальными данными.

Полистирол применяется в процессах при высокой концентрации энергии, в частности, в качестве материала абляционного покрытия мишени, облучаемой интенсивными лазерными импульсами [2]. Уравнение состояния полистирола в широком диапазоне давлений и температур необходимо для замыкания системы уравнений движения в подобных процессах.

В настоящей работе развита модель [3] уравнения состояния для полимерных материалов в обширной области изменения плотностей и температур. Построено уравнение состояния полистирола при интенсивных импульсных механических и тепловых нагрузках. При сильном динамическом воздействии на полистирол в этом материале наблюдаются физические и химические превращения, которые приводят к заметному изменению термодинамических свойств вещества при высоких давлениях [4]. В настоящей работе описание термодинамических характеристик проводилось отдельно для исходного материала и продуктов его превращения.

Представлены результаты расчетов по построенному уравнению состояния ударных адиабат образцов полистирола различной начальной плотности, а также кривых повторного ударного нагружения и изоэнтропической разгрузки ударно-сжатых образцов в сопоставлении с имеющимися данными экспериментов с волнами ударного сжатия и адиабатического расширения.

Предложенная модель термодинамики позволяет адекватно описать экспериментальную информацию о поведении полистирола при высоких давлениях и температурах. Построенное уравнение состояния может быть использовано при гидродинамическом моделировании ударно-волновых процессов в этом веществе.

Список литературы:

1. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.
2. Gaffney J.A., et al. A review of equation-of-state models for inertial confinement fusion materials // High Energy Density Phys. 2018. V. 28. P. 7–24.
3. Хищенко К.В. Температура и теплоемкость полиметилметакрилата за фронтом сильных ударных волн // ТВТ. 1997. Т. 35. № 6. С. 1002–1005.
4. Бушман А.В., Жерноклетов М.В., Ломоносов И.В., Сутулов Ю.Н., Фортов В.Е., Хищенко К.В. Экспериментальное исследование фенилона и полистирола в условиях ударного нагружения и изоэнтропического расширения. Уравнение состояния пластиков при высоких плотностях энергии // ЖЭТФ. 1996. Т. 109. № 5. С. 1662–1670.

E-mail: konst@ihed.ras.ru

Секция 9 Теплофизические проблемы энергетики, энергоэффективность и энергосбережение

УДК 662.739

УДЕЛЬНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ УГЛЕРОДНОГО ОСТАТКА ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ КОНВЕРСИИ СМЕСИ ТОРФА С ДРЕВЕСНЫМИ ОПИЛКАМИ

Берикболов А.К.[1], Янковская Н.С.[1], Мисюкова А.Д.[1, 2], Янковский С.А.[1,2]

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

[2] Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, Кемерово, ул. Весенняя, 28

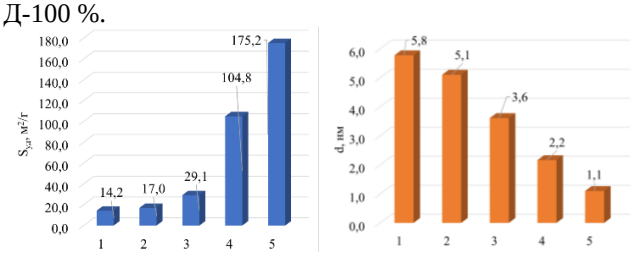
В последние десятилетия наблюдается значительное увеличение научной активности в области исследования и разработки углеродных материалов. Это проявляется в систематическом создании различных аллотропных форм углерода, таких как карбины, фуллерены, нанотрубки, циркулены, а также в разработке широкого ассортимента пористых материалов, включая смешанные (переходные) формы углерода, которые имеют практическое применение в качестве адсорбентов, катализаторов и носителей для катализаторов. Новые подходы также разрабатываются для изучения химического состояния и реакционной активности углеродных поверхностей [1].

Активный углерод может быть получен путем пиролиза (карбонизации) углеродсодержащих материалов, таких как древесина, торф, каменный уголь, лигнин, смолы, нефтяные остатки, фруктовые косточки, скорлупа орехов и т.д, при температурах от 500 до 1000 ˚С. Одним из возможных новых решений получения углерода может стать смесь торфа в сочетании с древесными отходами [1]. Торф, обладающий высокой пористостью и содержанием органических веществ, рассматривается как ценное сырье, в то время как древесные отходы служат углерод-нейтральной добавкой, способствующей горению при более низких температурах [2].

В качестве исходного материала был использован торф Суховинского месторождения Томской области, добытый с глубины 0,5-1 м. В качестве добавки к торфу использовались отходы лесопиления из села Дзержинское, Томская область. Перед началом эксперимента оба компонента были измельчены с помощью лабораторного измельчителя Stegler-1000 и просеяны через лабораторное сито РЛ-1. Частицы торфа просевали через сито с размером ячеек 80 мкм, а частицы древесины - через сито с размером ячеек 200 мкм. Затем оба компонента были смешаны в различных массовых пропорциях в течение 5 минут. Масса смеси, помещаемой в тигель, составляла 8 грамм, и нагревалась до температуры 600 ˚С. Во время эксперимента продолжалась непрерывная подача инертного газа с целью исключения окисления пиролизируемых компонент.

Текстурные характеристики образца были определены с использованием анализатора Sync 420A (3P Instruments, Germany). Подготовка образца включала предварительное удаление внешней влаги на дегазаторе в течение 10 часов при 105°С в вакууме. Удельная площадь поверхности образца была рассчитана методом Брунауэра-Эммета-Теллера, а объем пор и распределение пор определялись методом Баррета-Джойнера-Халенды.

На рисунке 1 приведены типичные результаты удельной площади поверхности углеродов, полученные при различном концентрационном соотношении торфа и древесных опилок: 1) Т-100 %; 2) Т-90 %/Д-10 %; 3) Т-75 %/Д-25 %; 4) Т-50 %/Д-50%; 5) Д-100 %.



а) б)

Рис. 1. Типичные результаты: а) удельная площадь поверхности углеродов; б) средняя пористость углеродов

Как показано на рисунке 1, добавление доли древесины к торфу и последующее получение углеродных материалов на их основе привело к увеличению удельной площади поверхности. Удельная площадь поверхности при концентрации ТО_50 % / ДО_50 % составила 104,849 м^2/г и продемонстрировала наивысший результат среди всех образцов.

В соответствии с результатами анализа, полученный углерод при различных концентрационных соотношениях торфа и древесных опилок обладает мезопористой структурой. Размер пор в основном составляет от 2 до 6 нм (см. рис. 1, б).

Углерод имеет широкий спектр применений в области очистки воды, включая питьевую и сточную воду, а также водные растворы, такие как спиртные напитки и сахарные сиропы. Они функционируют как адсорбенты, способные поглощать пары из газовых выбросов, например, для удаления диоксида серы из воздуха, а также для улавливания паров летучих растворителей с последующим их восстановлением, а в случае активированных углей их применение еще шире, например, в противогазах, в хроматографии и в вакуумной технике, где они служат для создания сорбционных насосов [1].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № FZES-2024-0001.

[1] H. Tolvanen, L. Kokko, and R. Raiko, “Fast pyrolysis of coal, peat, and torrefied wood: Mass loss study with a drop-tube re-actor, particle geometry analysis, and kinetics modeling,” Fuel, vol. 111, pp. 148–156, Sep. 2013.

[2] Y. Li, H. Zhao, X. Sui, X. Wang, and H. Ji, “Studies on indi-vidual pyrolysis and co-pyrolysis of peat–biomass blends: Thermal decomposition behavior, possible synergism, product characteristic evaluations and kinetics,” Fuel, vol. 310, p. 122280, Feb. 2022.

УДК 621.45.038

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ ПОДОГРЕВА В ВИХРЕВЫХ ТРУБАХ РАЗЛИЧНОЙ ДЛИНЫ

Бумагин Д. А.[1], Веретенников С. В.[1]

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

Энергетические газотурбинные установки (ГТУ) могут эксплуатироваться в различных районах нашей страны, где погодные условия могут создавать серьезную опасность для входных устройств энергоустановок по причине возможного обледенения конструктивных узлов. Это может привести к выходу из строя всего осевого компрессора. Проблема надежной защиты входных устройств ГТУ от обледенения представляет большой интерес для наземных энергетических машин, работающих различных отраслях энергетики России.

Одним из возможных вариантов противообледенительной системы (ПОС), использующей внедрение элементов подогрева газотурбинных установок, подверженных оседанию влаги, является система, использующая вихревую трубу, реализующую эффект Ранка-Хилша. Он заключается в разделении потока входящего газа на горячие и холодные массы. В этом случае вихревая труба встраивается в лопатку входного направляющего аппарата компрессора. Реализация эффекта подогрева дает возможность дополнительно нагреть поверхность лопатки на 30÷70°С.

Цель работы заключается в исследовании зависимости эффекта подогрева от длины камеры энергоразделения (КЭ).

Для сравнения различных вариантов длины КЭ (6, 9, 12, 25 калибров) экспериментальные исследования были проведены при различных значения относительного давления на входе π и относительной доле охлажденного потока μ, равной отношению расхода на выходе охлажденного потока к расходу на входе в модель.

С помощью технологий 3D-печати созданы корпусные элементы разборной конструкции вихревой трубы.

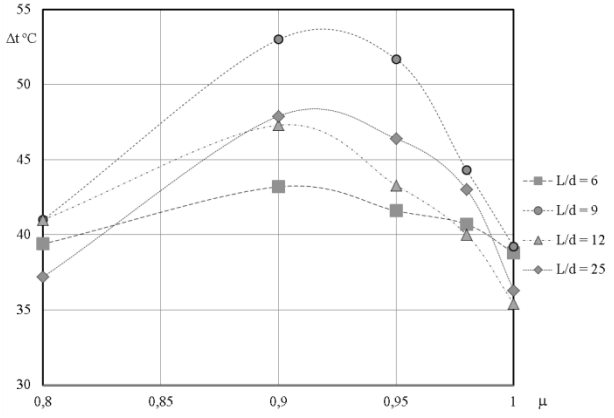


Рис. 1. График зависимости перепада температур от длины КС и μ при перепаде давления 0,4 МПа.

При давлении на входе 0,4 МПа видна существенная разница между КЭ длиной 9 калибров и остальными длинами (6, 12, 25 калибров). Наибольшее снижение эффективности подогрева наблюдается для вихревой трубы с 6-калибровой камерой энергоразделения. Для труб с камерами энергоразделения 12 и 25 калибров разница составляет не более одного-трех градусов, что сопоставимо с погрешностью измерения термопары.

Анализируя полученные экспериментальные данные можно сделать вывод, что наибольшие эффекты подогрева при $\pi \leq 2$ получаются на 12 калибровой вихревой трубе с установленным раскручивающим устройством. При $\pi > 2$ наибольшие эффекты подогрева выходят на 9-калибровой вихревой трубе с установленным раскручивающим устройством в виде пластины.

Полученные данные несколько расходятся с традиционной теорией вихревых труб, согласно которой эффекты энергоразделения монотонно растут с увеличением длины камеры энергоразделения. В области наиболее эффективных режимов подогрева, которая ранее детально не исследовалась, наблюдается изменение трендов по эффектам энергоразделения. Замечено снижение эффектов подогрева на 9 и 25 калибровой вихревой трубе. Данная ситуация требует дополнительного изучения и прояснения.

Сравнивая полученные результаты экспериментальных исследований, видна прямая зависимость теплового эффекта от длины камеры энергоразделения. Также надо отметить, что при различных значениях относительного давления на входе π, оптимальная длина камеры энергоразделения изменяется. Это связано с особенностями течения закрученного потока. Выявленная закономерность заключается в том, что при значениях $\pi \leq 2$ наибольшей эффективностью обладает вихревая труба с камерой энергоразделения длиной 12 калибров. При $\pi > 2$ наибольшей эффективностью обладает вихревая труба с камерой энергоразделения длиной 9 калибров.

Список литературы:

1. Михайлов, В. Е. Предотвращение обледенения элементов воздухозаборного тракта ГТУ энергетических ПГУ / В. Е. Михайлов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. — 2009. — № 9–10. — С. 3–12. 2. Пиралишвили, Ш. А. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения / Ш. А. Пиравишвили, В. М. Поляев, М.Н. Сергеев; под редакцией А. И. Леонтьева. — Москва : УНПЦ «Энергомаш», 2000. — 412 с.

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

УДК 536.715

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НИЗКОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНОЛА НА КИНЕТИКУ ОБРАЗОВАНИЯ ГИДРАТОВ МЕТАНА ИЗ РАСТВОРА

Гец К.В.[1,2], Жданов Р.К.[1,2], Божко Ю.Ю.[1,2], Белослудов В.Р.[1,2]

[1] Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2
[2] Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 3

Газовые гидраты – это кристаллические соединения включения на основе воды, образующиеся путём включения молекул газа в полости, имеющиеся в его структуре. Углекислый газ, лёгкие углеводороды, сероводород, азот и их смеси являются наиболее распространёнными газами, образующим гидраты. В большинстве случаев для роста газовых гидратов требуется создание необходимых термодинамических условий, обычно это высокое давление и/или низкая температура. Отличительной особенностью данных соединения является большое удельное содержание газа в структуре, что можно использовать для хранения и транспортировки различных газов (в т.ч. природного и углекислого газов или водорода). Несмотря на большое количество преимуществ, медленная кинетика гидратообразования всё ещё является одной из основных проблем: она сильно зависит от температуры и давления в системе, от соотношения компонентов системы, а также наличия промоторов или ингибиторов.

Одними из наиболее распространённых промоторов являются тетрагидрофуран, циклопентан, четвертичные соли и лаурилсульфат натрия. Метанол в основном рассматривается как ингибитор гидротообразования. Однако, метанол, как и другие низкомолекулярные спирты в малых концентрациях способны выступать в качестве кинетических промоторов, поверхностно-активных веществ [1,2]. При этом эффект наиболее ярко выражен эффект в аэрозольных системах [3] по сравнению с объёмными растворами [4]. Механизм влияния метанола про процесс гидратообразования остаётся малоизученным.

В данной работе проводится исследование влияния молекул метанола на кинетику образования газовых гидратов метана и сопутствующее перестроение сетки водородных связей молекул воды, формирующей кристаллическую структуру гидрата. Для исследования использовался метод молекулярной динамики (программный пакет LAMMPS). Для моделирования при помощи пакета PackMol была сконструирована серия моделей однородных водных растворов, состоящих из 3600 молекул воды, 250 молекул метана, а также 0, 10 и 20 молекул метанола, что соответствует 0, 0.5 и 1.0 масс.% метанола в растворах. Начальное положение молекул во всех модельных системах определялось случайным образом, что позволило добиться равномерного распределения их по объёму. Молекулы воды описывались потенциалом TIP4P/Ice, который даёт наиболее близкую к экспериментальной линию плавления льда. Молекулы метана и метанола были описаны при помощи полноатомной модели OPLS-AA.

В ходе исследования было показано разупорядочивающее влияние малой концентрации метанола на ближайшую структуру молекул воды (структуру сетки водородных связей). Для молекул воды были рассчитаны параметры порядков тетраэдричности ближнего порядка и межмолекулярных торсионных углов в зависимости от расстояния до ближайшей молекул метанола и метана. Наличие молекул метана упорядочивает структуру воды вокруг себя. Не было выявлено значительной корреляции между объёмным разупорядочением и рассматриваемой концентрацией метанола, что может быть связано с достаточно низкой концентрацией метанола. Это согласуется с имеющимися данными, согласно которым в объёмном растворе влияние метанола выражено слабо. Моделирование проводилось при условиях, при которых рост гидрата возможен без присутствия метанола.

Локальное разупорядочение, однако привело в среднем к снижению индукционного времени и более быстрому росту гидрата, что может быть связано с ускорением диффузии молекул метана и более раннему образованию зародышей гидрата, требующего повышения локальной концентрации метана. В ходе анализа было проведено изучение числа различных гидратных и гидратоподобных полостей, свойственных ранним этапам гидратообразования.

Повышение концентрации метанола до 2.5 и 5.0 масс.% или увеличение числа молекул метана часто приводит разделению раствора на газовую и жидкую фазы, а также выходу большей части метанола на границу раздела фаз.

Список литературы:

1. Kvamme B. Small Alcohols as surfactants and hydrate promoters // Fluids. 2021. V. 6. N. 10. P. 345.
2. Pandey J.S., Khan S., von Solms N. Screening of low-dosage methanol as a hydrate promoter // Energies. 2022. V. 15. N. 18. P. 6814.
3. Devlin J.P. Catalytic activity of methanol in all-vapor subsecond clathrate-hydrate formation // J. Chem. Phys. 2014. V. 140. N. 16. P. 164505.
4. Choudhary N, Kushwaha O.S., Bhattacharjee G., Chakrabarty S., Kumar, R. Molecular dynamics simulation and experimental study on the growth of methane hydrate in presence of methanol and sodium chloride // Energy Procedia. 2017. V. 105. P. 5026-5033.

УДК 536.24

ТЕПЛОВОЙ НАСОС ВМЕСТО ГРАДИРНИ

Гогонин И.И.

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

Хорошо известно, что вода, охлаждающая конденсатор электростанции, уносит до 40% общей энергии, полученной в котле или реакторе.

При конденсации массового потока пара 1 кг/с, необходим массовый поток охлаждающей воды – около 50 кг/с [1].

Существует несколько способов охлаждения конденсатора. Одним из них является прямоточный: вода берется из ближайшей реки или озера и после охлаждения конденсатора сбрасывается обратно в водоем. По санитарным нормам перед сбросом температура воды должна быть снижена на 8-12 ºС. Для этого сооружаются водоемы, где за счет испарения в воздух вода охлаждается перед сбросом [1].

Другим, часто использующимся способом охлаждения воды, является замкнутый цикл с использованием градирни. После охлаждения в градирне вода снова подается на вход в конденсатор. Однако, градирня – это дорогостоящее и громоздкое сооружение. Для мощных электростанций высота градирни колеблется от 90 м до 150 м, а диаметр на выходе достигает 40-60 м. Кроме того, градирни потребляют электроэнергию на привод водяного насоса, а в некоторых конструкциях и на привод вентилятора [1].

В представленном докладе делается попытка в первом приближении ответить на вопрос насколько выгодно использование теплового насоса вместо градирни, когда источником его энергии является вода на выходе из труб конденсатора электростанции.

Предполагается, что парогенератор теплового насоса является тонкопленочным аппаратом с горизонтальным расположением оребренных труб. Вода, обогревающая трубы, движется внутри труб, а наружная поверхность оребренных труб орошается кипящей пленкой изобутана при спутном движении пара и пленки [2].

Конденсатор теплового насоса предполагается изготовить из таких же оребренных труб, как и парогенератор. Алгоритм расчета конденсатора изложен в [3, 4]. При оптимальных параметрах оребрения, теплоотдача на пучке оребренных труб может быть на порядок интенсивнее, чем на пучке гладких труб.

К недостаткам использования теплового насоса вместо градирни следует отнести заметное осложнение конструкции станции. Даже обычная тепловая станция становится многоконтурной. Требуется монтаж дополнительного оборудования, дополнительные площади, дополнительные специалисты.

Самое сложное: необходимо иметь компрессоры огромной производительностью 285 кг/с или $3{,}8 \cdot 10^6$ л/мин.

Для изобутана давление на выходе из компрессора должно быть около 16 бар с температурой пара не менее 85 °С. Только при таких условиях можно получить из конденсатора теплового насоса воду с температурой 75 °С для бытовых нужд и обогрева жилищного массива. Если половина нагретой воды будет расходоваться на бытовые нужды, то в этом случае полная мощность теплового насоса уменьшится вдвое и составит около $38 \cdot 10^6$ Вт.

Охлаждение воды двух конденсаторов водяного пара позволяет получить суммарную мощность двух тепловых насосов $76 \cdot 10^6$ Вт, что составляет 25,3% от общей мощности станции на 300 мВт.

Тем не менее, предварительные оценки показывают, что при стоимости электроэнергии 5 руб/кВт·ч, годовая экономия составит $3{,}32 \cdot 10^9$ руб.

Эта сумма с большим запасом окупит все расходы на создание теплового насоса.

Таким образом, в докладе приведены оценочные результаты сравнительного анализа при замене градирни электростанции тепловым насосом.

Показано, что замена градирни тепловым насосом приводит к значительному повышению экономической эффективности станции. Срок окупаемости подобной модернизации станции не превышает одного года.

Недостатком подобной замены следует считать заметное увеличение отапливаемых площадей. Станция становится многоконтурной и поэтому усложняется ее обслуживание.

Список литературы:

1. Рыжкин В.Я. Тепловые электрические станции. М. 1976. Энергия, 447 с.
2. Гогонин И.И. Тонкопленочные парогенераторы бинарных геотермальных электростанций// Холодильная техника. 2022. Т.111. № 2. С. 97-104.
3. Гогонин И.И., Кабов О.А. Влияние плотности орошения на теплообмен при конденсации на пакетах ореберных труб// Инженерно-физический журнал. 1986. Т. 58. № 1. С. 16-22.
4. Гогонин И.И. Исследование теплообмена, при пленочной конденсации пара. Новосибирск, 2015. Из-во СО РАН, 251 с.

УДК 546.81+542.943-92

КИНЕТИКА И МЕХАНИЗМЫ ОКИСЛЕНИЯ ЖИДКОГО СВИНЦА ВЫСОКОПЛОТНЫМ ВОДОКИСЛОРОДНЫМ ФЛЮИДОМ

Гребенников А.П., Востриков А.А., Федяева О.Н.

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

Интерес к исследованию окисления свинца вызван его широким использованием в электронной и электрической технике [1,2], в качестве жидкометаллического теплоносителя в атомной энергетике [3]. Согласно [4], заметное окисление свинца кислородом начинается при $T \geq 373$ К и включает три стадии: хемосорбцию и диссоциацию молекул O_2 на поверхности свинца; диффузию атомарного кислорода в решетке и нуклеацию оксида; кристаллизацию и рост оксидной фазы. По мнению авторов [5], заметное выделение H_2 в результате окисления жидкого свинца водяным паром может протекать при $T > 1073$ К и наличии кислорода в расплаве. Отметим, что по сравнению с экзотермическим окислением жидкого свинца ($T_{пл}$ = 600.6 К) кислородом, его окисление водяным паром сопровождается поглощением тепла:

$3(Pb)^l + 2O_2 \rightarrow Pb_3O_4$, $\Delta H = -738$ кДж/моль,

$3(Pb)^l + 4(H_2O)^g \rightarrow Pb_3O_4 + 4H_2$, $\Delta H = +229$ кДж/моль.

Взаимодействие свинца с кислородом, водяным паром и водокислородным флюидом в условиях высокой плотности компонентов реакционной смеси и равномерного (1 К/мин) нагрева реактора до 873 К изучено нами ранее [6]. Исходя из сравнительного анализа величин средней скорости окисления свинца в среде O_2, H_2O и H_2O/O_2, сделан вывод о синергетическом эффекте воды и кислорода на окисление, усиливающемся при увеличении содержания O_2 в реакционной смеси и уменьшении плотности водяного пара. Показано [6], что в отличие от окисления свинца в среде O_2, приводящего к образованию плотной оксидной пленки, формирование рыхлого слоя в смеси H_2O/O_2 способствует более глубокому проникновению окислителя к поверхности металла и, как следствие, увеличению степени его превращения в оксид.

В докладе представлены результаты исследования окисления жидкого свинца водокислородным флюидом (ρ_{H_2O} = 1.42-2.78 и ρ_{O_2} = 0.97-4.69 моль/дм^3) в изотермическом режиме. Методом впрыска H_2O/O_2 флюида в реактор при различных температурах (623, 673, 723, 773 и 873 К) получены временные зависимости давления, исходя из которых с помощью уравнения состояния Редлиха-Квонга рассчитаны зависимости количества O_2 в реакционной смеси (рис. 1) и описана кинетика окисления. Обнаружена немонотонная зависимость скорости окисления свинца от температуры и мольного отношения $\varphi = n_{H_2O}/n_{O_2}$. Так, увеличение температуры от 673 до 773 К при $\varphi \approx 1.5$ приводит к снижению скорости окисления от 7.42 до 0.23 мкмоль/(мин·см^2), а уменьшение φ от 2.55 до 1.45 при 673 К способствует повышению скорости окисления от 0.34 до 7.42 мкмоль/(мин·см^2).

Согласно данным рентгенофазового анализа, Pb_3O_4 (сурик) является основным компонентом продуктов окисления, в составе которых также идентифицированы PbO и PbO_2. С помощью сканирующей электронной микроскопии установлено, что морфология частиц оксида зависит от температуры и состава флюида. В частности, окисление свинца при 673 К и φ = 1.45 приводит к образованию полиэдрических кристаллов со средним размером 2-3 мкм. Механизмы окисления свинца обсуждаются с точки зрения изменения свойств воды при увеличении температуры и диссоциативной адсорбции молекул O_2 и H_2O на поверхности свинца и его оксидов.

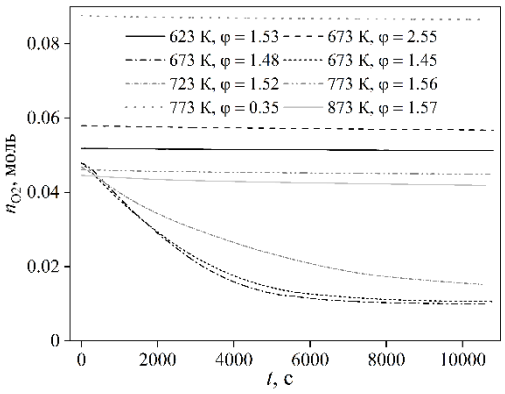


Рис. 1. Временные зависимости количества O_2 в реакционной смеси при окислении свинца H_2O/O_2 флюидом.

Полученные результаты могут быть полезны при проектировании и обеспечении безопасности работы энергетических установок в атомной энергетике, при разработке способов переработки компонентов электронного и электрического оборудования, а также развитии новых подходов к синтезу оксидных частиц с использованием сверхкритических водных флюидов.

Список литературы:

1. May G.J., Davidson A., Monahov B. Lead batteries for utility energy storage: A review // J. Energy Storage. 2018. V. 15. P. 145-157.
2. Cui J., Forsberg E. Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: A review // J. Hazard. Mater. 2003. V. 99. P. 243-263.
3. Зродников А.В., Ефанов А.Д., Орлов Ю.И., Мартынов П.Н., Троянов В.М., Русанов А.Е. Технология тяжелых жидкометаллических теплоносителей свинец-висмут и свинец // Атомная энергия. 2004. Т. 97, №2. С. 98-103.
4. Sun B., Zhang P., Wang Z., Duan S., Zhao X.-G., Ma X., Xue Q.-K. Atomic oxygen adsorption and incipient oxidation of the Pb(111) surface: a density-functional theory study // Phys. Rev. B. 2008. V. 78. P. 035421.
5. Gulevich A.V., Martynov P.N., Gulevsky V.A., Ulyznov V.V. Technologies for hydrogen production based on direct contact of gaseous hydrocarbons and evaporated water with molten Pb or Pb-Bi // Energy Conv. Manag. 2008. V. 49. P. 1946-1950.
6. Fedyaeva O.N., Grebennikov A.P., Vostrikov A.A. Peculiarities of bulk lead sample oxidation in a water–oxygen fluid // Russ. J. Phys. Chem. B. 2023. V. 17. P. 1628-163

УДК 52-17, 628.524, 621.43.043.1

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СЖИГАНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В МАЛОГАБАРИТНОЙ ТОПОЧНОЙ КАМЕРЕ

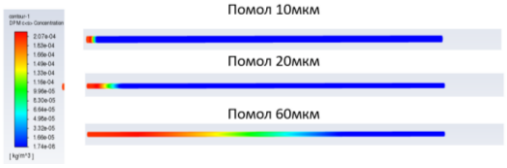
Алексеенко С.В.[1], Дектерев А.А[1,2] , Дектерев Ар.А.[1,2], Кузнецов В.А.[1,2] Тэпфер Е.С.[1], Шадрин Е.Ю.[1]

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

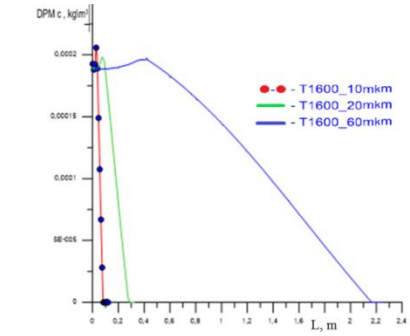
[2]Сибирский Федеральный Университет,
660041, Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79

В малых топочных устройствах угольное топливо сжигается в слое в виде достаточно крупных кусков. При этом добиться эффективного управления сжиганием угля практически невозможно, что приводит к большому недожегу топлива и выбросу мелкодисперсных частиц в атмосферу. Горение пылеугольного топлива организуют в крупных энергоблоках, что обосновано необходимостью достаточно длительного времени пребывания угольных частиц в топочном объеме. В малогабаритных топках угольная пыль не успевает пройти все фазы, сопутствующие горению угля: прогрев частиц; выход влаги и летучих компонент; выгорание коксового остатка.

Для определения скорости выгорания мелкодисперсной пыли угля Кузнецкого месторождения были выполнены расчетные оценки горения угля пыли различного помола в модельной камере - длинной трубе. Из рисунка 1 видно, что для пыли размером до 40 мкм возможно организовать полное выгорание в устройстве размером до 0,6 м, при этом необходимо иметь достаточно высокий (свыше 1300°C) уровень температуры несущего потока.



а)



б)

Рис.1. Влияние размера угольных частиц 10, 20 или 40 мкм на скорость их выгорания. Начальная температура пылеугольного потока 1600 К. а) картина выгорания угольной пыли вдоль трубы; б) график выгорания.

В ИТ СО РАН отработаны ряд технологий получения угля микропомола [1], созданы специальные горелочные устройства интенсивного сжигания жидких топлив с применением высокоскоростной струи перегретого пара [2], позволяющие получит высокую температуру необходимую для воспламенения угольных частиц. Введение частиц угля микропомола в высокотемпературную зону горения жидкого топлива способствует интенсивному протеканию всех процессов в угольной частице и резкому сокращению времени ее выгорания. Это позволило предложить горелочное устройство и малогабаритную камеру сгорания для сжигания пылеугольного топлива.

Экспериментальные исследования показали, что использование дизельного и мелкодисперсного угольного топлива микропомола в специальной паромасляной горелке и малогабаритной топочной камере водогрейного котла Viessmann Vitola 200 позволяет получить устойчивое горение угольного топлива. При сравнении результатов моделирования с данными экспериментов показано, что модель с достаточной точностью описывает процессы теплообмена и выгорания угольной пыли в топочной камере в рассмотренных в эксперименте режимах. Проведено расчетное исследование влияния параметров работы горелочного устройства: фракционный состав угольной пыли; расход пара, избыток воздуха на процессы в камере сгорания водогрейного котла.

Однако используемая в эксперименте тангенциальная схема ввода угольной пыли приводит к существенной сепарации частиц и высокому недожегу топлива. Предложен вариант прямоточного горелочного устройства для топочной камеры водогрейного котла Viessmann Vitola 200, позволяющий проводить совместное сжигание дизельного топлива и угольной пыли в соотношении 50/50 по массовой загрузке. При этом наблюдается стабильное горение факела и низкий недожог угольного топлива.

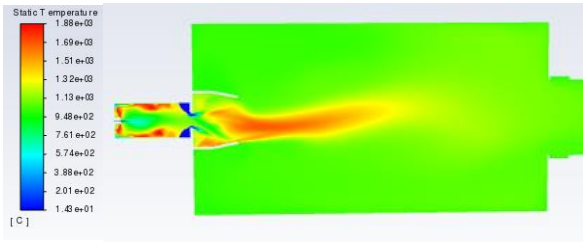


Рис.2. Поле температур в топочной камере с прямоточной горелкой при сжигании угля микропомола.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН

Список литературы:

1. Бурдуков А.П., Попов В.И., Фалеев В.А., Юсупов Т.С. Использование механоактивированных углей микропомола в энергетике. // Ползуновский вестник. 2010. № 1. с. 93-98.

2. Копьев Е.П., Ануфриев И.С., Шадрин Е.Ю., Лобода Е.Л., Агафонцев М.В, Мухина М.А. Изучение характеристик пламени горелочного устройства при распылении жидких углеводородов паровой струей // Доклады АН ВШ РФ. 2019. №2 (43). С. 38-55.

УДК 533.69

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ТОРЦЕВЫХ СТЕНОК НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЦИКЛОИДАЛЬНОГО РОТОРА

Дектерев Д.А.[1,2], Дектерев Ар.А.[1,2], Необъявляющий П.А. [1]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] Сибирский федеральный университет,
660041, Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79

В последние десятилетия заметно увеличился интерес к использованию циклоидальных роторов в качестве движителей летательных аппаратов. В первую очередь делается ставка на способность быстрого изменения тяги по силе и направлению, а также сравнительно невысокий уровень шума при работе ротора. Создаются прототипы так называемых циклолетов (цикложиров) различного масштаба и конструкции. Кроме того, рассматриваются традиционные схемы летательных аппаратов, в состав которых добавляются циклоидальные пропеллеры с целью повышения маневренности или стабилизации при боковых порывах ветра. Тем не менее, эффективность подобных пропеллеров на сегодняшний день едва ли достигает значения в 5 кг/кВт. Таким образом, повышение эффективности циклоидальных роторов является весьма важной задачей.

Одним из важных элементов ротора являются торцевые стенки. В работе [1] было показано, что применение открытых или закрытых торцов в значительной мере сказывается на аэродинамике ротора, в частности на формируемом им потоке, а также влияет на тягово-энергетические параметры. Применение закрытых торцов приводит к заметному росту эффективности работы ротора. Сделав выбор в пользу закрытых торцов, возникает вопрос о выборе их оптимальной конструкции.

В отличие от открытых торцов, закрытые торцы являются непроницаемыми для воздуха, и значительная его часть забирается через периферийную кромку. Экспериментально было замечено, что в случае применения острой кромки, при её обтекании может формироваться отрывное течение, приводящее к формированию застойных зон по краям лопасти (Рис.1.а), тем самым уменьшая её эффективную длину. Применение округлых кромок (обтекателей) помогает избавиться от этого эффекта (Рис.1.б).

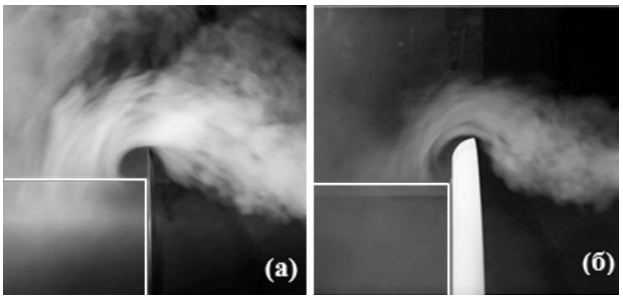


Рис.1 – Визуализация входного потока

С помощью численного моделирования были рассмотрены 4 варианта конструкции торцевых стенок (Рис.2) и произведена оценка их влияния на эффективность работы ротора.

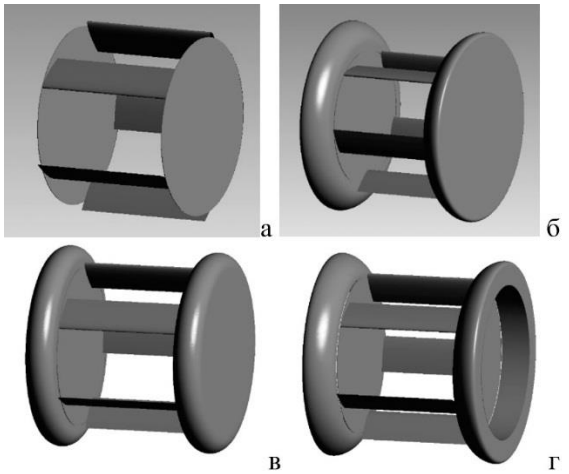


Рис.2 – Варианты торцевых стенок

За базовый вариант (а) выбраны прямые тонкие торцевые стенки без обтекателей, вариант (б) представляет собой несимметричные обтекатели, вариант (в) – симметричные обтекатели, вариант (г) – несимметричные обтекатели кольцевой формы.

В таблице 1 приведены данные расчета, приведенные к базовому варианту.

Таблица 1

Вариант	Тяга	Мощность	Эффективность
а	1	1	1
б	1,017	0,935	1,086
в	1,038	0,963	1,078
г	1,006	0,935	1,072

Из таблицы видно, что применение обтекателей во всех случаях приводит к заметному росту эффективности. При этом вариант с несимметричными обтекателями показал себя наиболее выгодным. Однако, стоит отметить, что производилась оценка параметров при работе роторов без набегающего потока, т.е. увеличение сопротивления движителя при движении на скорости не учитывалось. Также не оценивался рост массы движителя за счет установки обтекателей. Тем не менее, существуют конструкторские решения по размещению внутри обтекателей механизмов управления кинематической схемой ротора, в таком случае обтекатели могут выполнять и дополнительные важные функции.

Список литературы:

1. Dekterev, A. A., Dekterev, A. A., Dekterev, D. A., & Goryunov, Y. N. Investigation of the effects of end faces design on parameters of cycloidal rotor. In Journal of Physics: Conference Series – 2018 – (Vol. 1105, No. 1, p. 012029)

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН

УДК 533.69

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЯГОВО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАЛОГО ЦИКЛОИДАЛЬНОГО РОТОРА В НАБЕГАЮЩЕМ ПОТОКЕ

Дектерев Д.А.[1,2], Дектерев Ар.А.[1,2], Платонов Д.В.[1,2], Дектерев А.А.[1,2]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] Сибирский федеральный университет,
660041, Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79

Стремление к использованию циклоидальных роторов в создании летательных аппаратов и ветроэнергетических установок приводит к возникновению множества сопутствующих задач, требующих научного решения. Одной из наиболее важных задач является изучение взаимодействия ротора с набегающим потоком – это, с одной стороны, имитация полетного режима для движителей летательных аппаратов, с другой стороны, имитация рабочих режимов для ветроэнергетических установок.

В данной работе представляются результаты испытаний лабораторной модели ротора диаметром 300 мм и длиной 330 мм в аэродинамической трубе Т-324 ИТПМ СО РАН (рис.1) и на аэродинамическом стенде ИТ СО РАН.

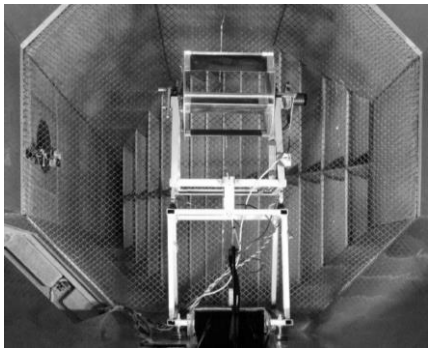


Рис.1 – Ротор в аэродинамической трубе Т324

В качестве изменяемых параметров циклоидального ротора служат: скорость вращения, максимальный угол атаки лопастей (общий шаг) и направление тяги (фазовый угол). Таким образом, с учетом варьирования скорости набегающего потока, задача представляет собой огромный пласт экспериментальных исследований, необходимых для составления режимных карт.

В ходе испытаний ротор устанавливался на тензометрическую платформу, позволяющую получать значения компонент сил, создаваемых ротором, при этом также оценивалась мощность, затрачиваемая на работу электродвигателя. В зависимости от ориентации относительно набегающего потока при виде сбоку, ротор может вращаться по часовой, либо против часовой стрелки. При этом, в зависимости от фазового положения лопастей, набегающий поток может раскручивать ротор как по ходу движения лопасти, так и против него.

Если говорить о ветроэнергетике, задача является стационарной и сводится к поиску оптимального сочетания углов установки лопастей и их фазового положения относительно набегающего ветра. Если же говорить о движителях летательных аппаратов, то задача усложняется непостоянством скорости набегающего потока. Это приводит к необходимости поддерживать создаваемые подъемную и пропульсивную силы, обеспечивать компенсацию опрокидывающих моментов и контролировать затрачиваемую на это энергию, динамически варьируя общий шаг и фазовый угол.

На рис.2 приведены данные одного из трубных экспериментов для фиксированного общего шага, частоты вращения и скорости набегающего потока. Видно, что при изменении фазовых углов от 0 до 180 градусов, для вариантов вращения в разные стороны создаются практически идентичные вертикальная и горизонтальная силы, но при этом требуется принципиально разная мощность для работы ротора (здесь нулевое значение по оси ординат соответствует потребной мощности на работу ротора без набегающего потока).

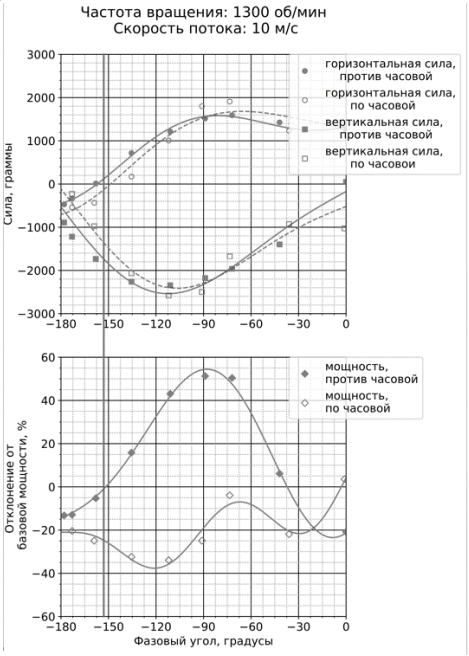


Рис.2 – Влияние набегающего потока на потребную мощность ротора

Стоит отметить, что несмотря на небольшой масштаб и довольно низкую эффективность лабораторного макета ротора, были получены данные, позволяющие понять аэродинамику и зависимость тягово-энергетических параметров циклоидальных роторов от скорости набегающего потока, которые в дальнейшем были масштабированы на размеры движителя реального летательного аппарата.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН

УДК 662.739

ЭФФЕКТИВНАЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО БУРОГО УГЛЯ И ДРЕВЕСНОЙ ЩЕПЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОЧНЫХ СМЕСЕВЫХ ТОПЛИВНЫХ БРИКЕТОВ

Берикболов А.К.[1], Янковская Н.С.[1], Есин К.С.[1], Янковский С.А.[1,2]

[1] Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30
[2] Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
650000, Россия, Кемерово, ул. Весенняя, 28

В современном мире наблюдается неуклонный рост потребления энергоресурсов, что определяется высокими темпами промышленного развития и ростом численности населения планеты. Изменение климата, вызванное агрессивной деятельностью человека, является причиной масштабного загрязнения окружающей среды. Решение снижения экологической нагрузки на окружающую среду за счет внедрения энергоэффективных технологий сжигания различных видов топлив, является актуальной задачей энергетической отрасли по всему миру. Одним из наиболее перспективным решением мировой проблемы является частичная замена традиционных топлив более экологичными углерод-нейтральными, например, биомасса [1]. Отходы лесопиления на сегодняшний день являются наиболее распространенным и доступным видом биомассы. Древесные отходы в виде щепы, обладают большим потенциалом, поскольку древесина сама по себе является возобновляемым ресурсом, в отличии от ископаемых видов топлив, а отходов лесопиления только на территории РФ в год формируется более 30 млн.т/год. Совместное сжигание биомассы с углем существенно расширит использование смесевых топлив в энергетике и улучшит экологические свойства углей. Выбор сырья для формирования древесно-угольных брикетов зависит от наличия отходов в каждом конкретном регионе мира, и этот список довольно широк: отходы лесопиления, жмых сахарного тростника, рисовая шелуха, отруби, кукуруза и др. [1]. Целью работы является обоснование возможности формирования эффективных щепо-древесных брикетов и обоснование возможности их сжигания в энергетических котлоагрегатах.

В качестве исходного материала был использован бурый уголь Балахтинского месторождения, Красноярский край. В качестве добавки к бурому углю использовались отходы лесопиления в виде щепы.

Для формирования брикетов в качестве отвердителя был выбрал ПВА клей. В пользу такого выбора сыграло следующее, конкурентная себестоимость, по сравнению с такими аналогами как: силикатный клей, клей на основе природных загустителей и др., доступность его использования, а именно большое количество предприятий в стране. Основной причиной выбора помимо перечисленных ранее клей ПВА является не токсичным для человека и окружающей среды, в том числе и при нагревании. Пример типичного приготовления состава компонент для приготовления щепо-древесного брикета: угольная пыль 500 г., древесная щепа 500 г., ПВА клей 330 мл. Крупный кусковой уголь размалывался до состояния пыли с размером частиц 1-2,5 мм, после чего смешивался с щепой в пропорции 1:1 (по массе), к полученной смеси добавлялся клей ПВА в объеме 300 мл. (разогретый до 60 °С), для придания формы брикету, с последующим отвердеванием. Процесс брикетирования был выполнен для различных составов в различных соотношения по массе компонент уголь/щепа/клей ПВА. Опытным путём было установлено оптимальное количество концентрации клея – 1/3 от сухой массы брикета. При меньшем количестве клея брикет не обладает хорошей структурой и должной прочностью, при переизбытке высыхание проходит достаточно длительное время и брикет в последствии будет обладать повышенной влажностью, что приведет к дополнительным затратам по сушке и увеличит конечную стоимость продукции. Для выполнения технических характеристик топлив, готовые составы брикетов были измельчены с помощью лабораторного измельчителя Stegler-1000 до пылевидного состояния, далее были отобраны аналитические пробы для проведения исследований.

Результаты технического анализа смесевых топлив показали, что увеличение доли щепы в угле до 50 %, приводит к существенному снижению зольности щепо-древесного топлива на 50,54 % и увеличению выхода летучих на 20,12 %. Время задержки зажигания такого состава брикета по сравнению с обычным бурым углем уменьшилось на 72,89 %.

Результаты экспериментальных исследований показали, что такие топлива теплотехническими характеристиками сопоставимыми с однородным углем, но с существенно низким содержанием вредных для окружающей среды газовых компонент, а также низкой по сравнению с углем зольностью. Новизной исследования является достаточно простой способ формирования щепо-древесных брикетов с применением дешевого, доступного и экологичного связующего вещества в виде клея ПВА в небольших концентрациях по массе по сравнению с топливными компонентами. Время задержки зажигания таких щепо-угольных брикетов существенно меньше по сравнению с однородным углем, что положительно скажется на процессе розжига котлоагрегата. Результаты экспериментальных исследований подтверждают возможность применения таких топливных композиций в слоевых энергетических котлоагрегатах.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации при финансовой поддержке проекта 075-03-2023-105/1 (FSWW-2022-0018).

[1] Alexandr Nikiforov, Akmaral Kinzhibekova, Evgeniy Prikhodko, Amangeldy Karmanov, Sholpan Nurkina, "Analysis of the Characteristics of Bio-Coal Briquettes from Agricultural and Coal Industry Waste," *Energies*, MDPI, vol. 16(8), pp. 1-16, Apr. 2023

УДК 621.57

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ РЕКУПЕРАТОРА ТЕПЛОТЫ САЛОННОГО ВОЗДУХА ЭЛЕКТРОБУСА

Закиров А.Ф. [1], Ермаков А.М. [1], Салахов Р.Р. [1]

[1] Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, 420111, Россия, Казань, ул. К. Маркса, 10

В отличии от автобусов на традиционном топливе, электробусы не располагают на своем борту источником высокотемпературного теплоносителя, теплоту которого можно использовать для обогрева в холодный период года, что приводит к дополнительным затратам энергии на поддержание требуемой температуры в салоне электробуса.

Экспериментальные данные представленные в работе [1] показывают увеличение затрат электроэнергии электробуса при понижении температуры окружающего воздуха с 18 °С до -8 °С увеличивается с 1 кВтч/км до 1,9 кВтч/км, что говорит о существенных затратах электроэнергии на обеспечение работы климатической системы.

Одним из вариантов экономии энергии на климатическую установку является использование теплоты воздуха выходящего из салона для подогрева холодного воздуха, подаваемого в салон с использованием рекуператора. Подобный подход уже успешно применяется в системах вентиляции и кондиционирования промышленных и административных зданий.

В данной работе проведен теплогидравлический расчет теплобменника-рекуператора для утилизации теплоты салона воздуха и проведено исследование его тепловой мощности в зависимости от температуры окружающего воздуха.

В качестве исходных данных заданы температура окружающего воздуха – 30 °С, температура салона электробуса +14 °С, расход воздуха для обеспечения номинальной загрузки пассажирами составил 1500 м^3/час.

Конструкция рекуператора представляет собой чередующиеся каналы теплого и холодного воздуха, в которых расположены деформированные пластины для увеличения площади теплообмена.

Разработанное компоновочное решение имеет плоскую форму для крышного расположения (см. рис.1.). Общее гидравлическое сопротивления по каждому из контуров воздуха не превышает 80 Па.

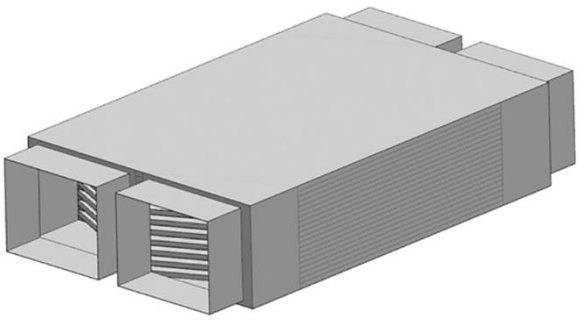


Рисунок 1. Трехмерная модель рекуператора

Тепловая мощность рекуператора на номинальном режиме составляет 17 кВт, а степень рекуперации тепла – 0,62.

Проведены расчеты теплового потока рекуператора при частоте вращения от 800 до 3200 об/мин с шагом 800 об/мин и температуры окружающего воздуха от -30 °С до +30 °С с шагом 5 °С (см. рис. 2).

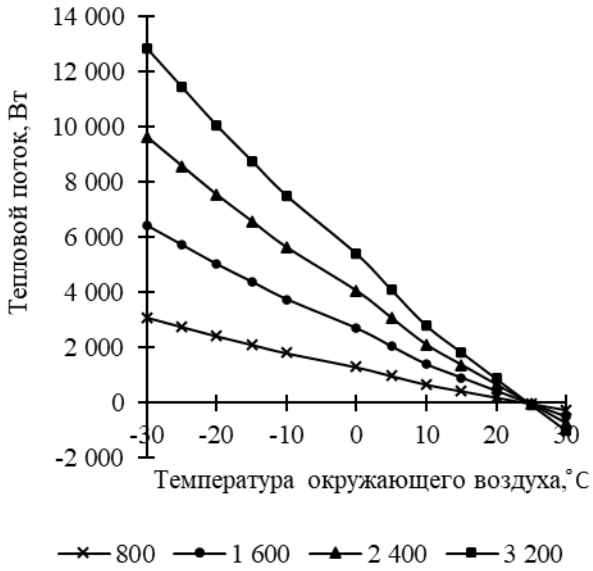


Рисунок 2. Зависимость тепловой мощности рекуператора от температуры окружающего воздуха

Результаты расчетов показывают, что с понижением температуры тепловой поток рекуператора увеличивается на всех оборотах вентилятора, однако с увеличением температуры более 20 °С тепловой поток рекуператора незначителен.

Таким образом можно сделать вывод о том, что рекуператор можно применять при температурах окружающего воздуха ниже +10°С, что снизит тепловую нагрузку на климатическую систему, а при более высоких температурах можно выпускать воздух минуя рекуператор, избегая дополнительного аэродинамического сопротивления создаваемое рекуператором.

Список литературы:

1. Iclodean C., Cordoș N., Todoruț A. Analysis of the Electric Bus Autonomy Depending on the Atmospheric Conditions // Energies. 2019. 12(23). 4535.

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

УДК 533.6

ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВУТ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДРОБЛЕНИЯ КАПЛИ

Сыродой С.В., Замалтдинов Р.Р.

Томский политехнический университет
630050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30

Перспективность внедрения водоугольного топлива в общий баланс тепло- и электрогенерации обоснована уже достаточно давно (например, [1]). Показано (по результатам экспериментальных [2] исследований), что при сжигании водоугольных топлив образуется значительно меньше оксидов серы и азота.

Но при всех преимуществах водоугольных технологий они имеют ряд значимых недостатков. Самым существенным из таковых считаются высокие значения времен задержки зажигания (до 15 секунд) типичных капель водоугольного топлива [3]. По результатам проведенных ранее экспериментальных исследований [4] установлено, что при распылении ВУТ образуются капли преимущественно с характерным размером от 1 до 3 мм. Времена задержки зажигания таких относительно крупных капель (даже при достаточно высоких температурах внешней среды Tg≥1273 K) составляет от 5 до 15 секунд (в зависимости от марки угля). На настоящее время разработаны и продолжают разрабатываться системы распыления водоугольного топлива, позволяющие формировать мелкодисперсный поток капель ВУТ. Однако, надежность таких систем не высока вследствие высокого эрозийного износа форсуночных аппаратов.

Цель данной работы – установление влияния температуры водоугольной суспензии на значения критического числа Вебера при движении капель в одном направлении с потоком воздуха.

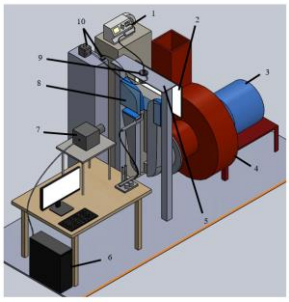


Рис. 1. Экспериментальный стенд: 1 - инфузионный шприцевой насос, 2 – источник света, 3-электродвигатель, 4 - центробежный вентилятор, 5 – стойка для изолирующего стакана, 6 – персональный компьютер, 7 – высокоскоростная камера, 8 – сопло, 9 – термоизоляционный стакан с емкостью для суспензии, 10 – ЛАТР с измерительным терморегулятором ТРМ 500.

Экспериментальные исследования проводились на стенде, схема которого приведен на рисунке 1. Основной частью экспериментального стенда было плоское специально спрофилированное сопло. Сечение последнего на входном участке составляло 350x20 мм, в выходном участке 20x20 мм. Длина соплового канала: L=180 мм. Противолежащие стенки сопла были выполнены из прочного стекла, с одной стороны которого устанавливался источник монохроматической плоской световой волны. С обратной стороны была установлена высокоскоростная видеокамера (Evercam 1000 - 32M с объективом Sigma AF 105mm f/2.8 EX DG OS HSM Macro). Сопловой канал через карман Рихтера подключался к центробежному вентилятору ВЦ5. Последний приводился в движение с помощью электродвигателя АДМ80И2У3, мощностью 2,2 кВт. ЛАТР с твердотельным реле и терморегулятором позволяли осуществлять контроль температуры в термоизолированном стакане с емкостью для дозирования суспензии на основе длиннопламенного угля.

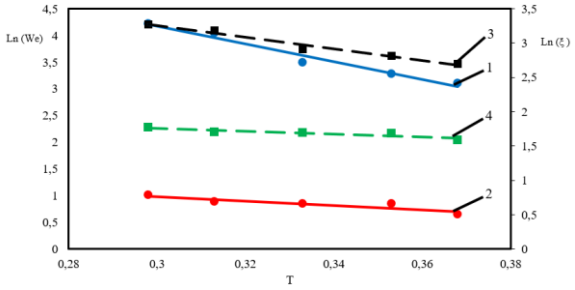


Рис. 2. Зависимость критического числа Вебера и относительной скорости витания капли $\xi = |V_g - V_d|$ (где: V_g, V_d – скорости воздуха и капли в зоне ее разрушения) от концентрации угольной компоненты в топливной капле.

На рисунке 2 приведены зависимости критического числа Вебера (We) и относительной скорости капли в момент разрушения (ξ) от температуры водоугольной суспензии. Можно отметить, что зависимости We(φ) и $\xi(\varphi)$ представляют собой линейную функцию, представленную в логарифмических координатах. Характер кривых обусловлен постепенным снижением поверхностного натяжения капель ВУТ. Это, скорее всего, связано с повышенной температуры жидкой компоненты, что приводит к активным внутрикапельным процессам, снижающих вязкостные характеристики ВУТ.

Исследование выполнено за счет грантов РНФ (проект № 23-79-10092)

Список литературы:

1. Зола и шлак при сжигании водоугольных суспензий / Бутылькова Т.Н., Делягин Г.Н. // Новые методы сжигания топлива и вопросы теории горения. – М.: Наука, 1969. - С.58-64.
2. Зажигание капли композиционного жидкого топлива в вихревой камере сгорания / Валиуллин Т.Р., Вершинина К.Ю., Глушков Д.О., Стрижак П.А. // Современные проблемы теплофизики и энергетики: Материалы Международн. конф., - Москва, 9-11 окт. 2017. – Москва. 2017. - С.105-106.
3. Ignition and combustion characteristics of coal - water fuels based on coal & semi-coke / Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Salomatov V.V., Malyshev D.Y., Kostoreva Z.A., Purin M.V., Yankovsky S.A. // Combustion and Flame. – 2022. – V. 246. – P. 112430.
4. Visualization study on breakup modes of coal water slurry in an impinging entrained-flow gasifier / Zhicun Xue, Yan Gong, Qinghua Guo, Fuchen Wang, Guangsuo Yu. // Fuel. – 2019. – V. 244. – P. 40-47.

УДК 533.6.011.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ПРИ НАЛИЧИИ ОСАДКОВ В ОБЛАСТИ УЛЬЯНОВСКОГО ВЕТРОПАРКА

В.Н. Ковальногов[1], Ю.А. Хахалев[1], М.И. Корнилова[1], О.В. Савелов[1], Д.С. Степанов[1]

[1]Лаборатория междисциплинарных проблем энергетики
Ульяновского государственного технического университета,
432027, Россия, Ульяновск, ул. Северный Венец, 32

В настоящее время можно отметить, что ветроэнергетика развивается опережающими темпами по сравнению с прогнозом развития отрасли [1]. Ветропарки работают на открытой местности, поэтому погода оказывает существенное влияние на выработку электроэнергии. Автором [2] отмечается снижение мощности ветротурбины при наличии осадков от 20 % при мелком моросящем дождике до 36% при мокром снеге. Лопастям приходится преодолевать инерцию частиц, разгоняя их. Также за счет налипания частиц на лопасти, увеличивается сопротивление трения и вес лопастей. В работе [3] представлены результаты, подтверждающие влияние осадков на эрозию лопастей, снижающие их ресурс прочности и срок службы. Также по мере эрозии, растет сопротивление трения на поверхности и снижаются характеристики лопастей, что ведет к снижению вырабатываемой мощности.

В данной работе предпринято численное моделирование двухфазного потока за одиночной турбиной Ульяновского ветропарка в среде Star CCM+. Модель ветротурбины в натуральную величину расположена в расчетном тоннеле 2200×300×300 м. Производилось сгущение сетки в пристеночных областях ветротурбины, подстилающей поверхности и в ближнем следе за ветротурбиной. Шаг по времени составил 0,01 с. В качестве начальных условий задавался степенной профиль скорости и линейный профиль температуры, соответствующие географической широте расположения Ульяновского ветропарка для летних и переходных условий. При расчете использовался RANS подход и модифицированная k-ω SST модель Ментера. Двухфазный поток моделировался с помощью Лагранжевой многофазности. Были смоделированы крупные капли дождя, которые движутся в расчетном тоннеле под действием группы сил.

Расчет компонент скорости дисперсной фазы производится по формуле [4]

$$m_L \frac{du_{Li}}{dt} = F_D + F_{PG} + F_{SL} + F_g = \sum_i F_i,$$

Здесь m_L – масса капли, определяемая из выражения

$$m_L = \frac{\rho_L \pi d^3}{6},$$

где ρ_L – плотность, кг/м^3; d – диаметр капли, м; F_D, F_{PG}, F_{SL}, F_g – сила аэродинамического сопротивления, сила эквивалентная градиенту давления несущей среды, радиальная сила и сила гравитации соответственно, Н. Нижний индекс $_L$ относится к капле.

Сила аэродинамического сопротивления в свою очередь определяется как

$$F_D = C_D(\rho\pi d^2/8)(u_i - u_{Li})|u - u_{Li}|,$$

где C_D – коэффициент сопротивления капли,

Сила эквивалентная градиенту давления несущей среды определяется по формуле

$$F_{PG} = \rho \frac{\pi d^3}{6} \frac{Du}{Dt};$$

радиальная сила определяется по формуле

$$F_{SL} = 1{,}615 d^2 \rho (u - u_L) \sqrt{\nu \left| \frac{du_i}{dx_j} \right|};$$

и сила гравитации определяется в соответствии с выражением

$$F_g = m_L g \left(1 - \frac{\rho}{\rho_L}\right).$$

Результаты расчета показывают, что крупные капли дождя существенно влияют на профиль скорости в ближнем следе. Сразу за ветротурбиной отмечается больший дефицит скорости по сравнению с однофазным потоком. Это можно объяснить инерционностью частиц, которые дополнительно тормозят поток и требуют затраты энергии для разгона. Температура в продольном осевом сечении показывает расслоение, которое можно объяснить распределением и группировкой частиц осадков в ближнем следе. Так как моделировались крупные капли, они не увлекаются мелкими турбулентными пульсациями, а только крупными вихрями. Полученные результаты расчета дисперсного потока за ветротурбиной удовлетворительно согласуются с данными других авторов [5].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00030

Список литературы:

1. GWEC Global Wind Report 2023. URL: https://gwec.net/globalwindreport2023/
2. Robert D. Corrigan, Effect of precipitation on wind turbine performance/ National Aeronautics and Space Administration Lewis Research Center. May 1985 //https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19850019074/.pdf
3. A.Sh. Vermaa, S.G.P. Castrob, Numerical investigation of rain droplet impact on offshore wind turbineblades under different rainfall conditions: A parametric study/Feb. 2020 Composites doi 241:112096: 10.1016/j.compstruct.2020.112096//
4. М. А. Пахомов, В. И. Терехов Сравнение эйлерова и лагранжева описаний при исследовании течения и теплообмена в газокапельном осесимметричном отрывном турбулентном потоке // Прикладная механика и техническая физика. 2013. Т. 54, №4, с. 96 –109
5. М.М. Башаров, А.И. Фарахова. Модель турбулентного переноса дисперсной фазы в гидроциклоне / Труды VIII школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова – Казань: Изд-во КГЭУ, 2012. С. 232 –235

УДК 519.6, 621.1.016, 621.18

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СОВМЕСТНОГО СЖИГАНИЯ ТОЩЕГО УГЛЯ И ПРИРОДНОГО ГАЗА В ВИХРЕВОЙ ТОПКЕ С ВЕРХНЕРАСПОЛОЖЕННЫМ ВТОРИЧНЫМ ДУТЬЕМ

Красинский Д.В.[1]

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

Для соответствия жестким требованиям экологической чистоты и энергоэффективности, в современной теплоэнергетике необходима разработка и внедрение новых технологий сжигания природного топлива, в т.ч. при модернизации существующего парка топочных устройств ТЭС на угле. Одним из перспективных направлений для этого является использование технологии сжигания распыленного угля в вихревом потоке. Применение вихревой технологии сжигания (ВТС) позволяет решать задачи уменьшения размера и повышения теплонапряженности топочного устройства, улучшения экологических показателей, что может быть достигнуто применением новых схем внутренней аэродинамики топочного устройства [1]. Топочная камера, реализующая принцип ВТС, была разработана в 1970–80-х годах в НПО ЦКТИ и известна как вихревая топка ЦКТИ [1-2].

В рамках работ ИТ СО РАН по научному обоснованию перспективных схем и конструктивных решений для экологически безопасного и энергоэффективного сжигания низкосортных угольных топлив, разработана усовершенствованная схема вихревой топки (ВТ). Эта схема топки, в отличие от ВТ ЦКТИ, характеризуется дополнительным тангенциальным дутьем через горелку, расположенную в верхней части вихревой камеры горения и ориентированную вертикально вниз (патент РФ № 2585347), поэтому такую схему подачи горелочных струй в ВТ можно назвать конфигурацией «ВТ2В» с верхнерасположенным вторичным дутьем.

В предыдущих исследованиях соавторов для схемы ВТ2В вихревой топки [3] рассматривалось использование бурых углей Канско-Ачинского бассейна в качестве твердого топлива. В связи с важностью расширения диапазона углей, предназначенных для сжигания в новой конструкции ВТ2В, актуальным является исследование вариантов сжигания в ней тощих углей. Действительно, технология форсированного режима сжигания распыленного угля в вихревом потоке, применяемая в исследуемой топке ВТ2В, позволяет обеспечить интенсификацию тепломассообмена в реагирующей двухфазной смеси, что способствует эффективному сжиганию широкого спектра низкосортных углей, в т.ч. трудновоспламеняемых углей с пониженным содержанием летучих. В качестве такого угольного топлива выбран дальневосточный тощий уголь марки «Т» (Партизанский угольный бассейн Приморского края РФ), его характеристики приняты по справочным данным.

Вместе с этим, в проведенном численном исследовании рассмотрено применение природного газа как второго топлива в топке ВТ2В, что актуально ввиду двух факторов. Во-первых, при комбинированной подаче угля и газа возможно широкое регулирование нагрузки котла с изменением от минимальной в летний период (с подачей только газа), до максимальной в зимний период. Во-вторых, подача природного газа (метана) даёт присутствие углеводородных компонент в реагирующей смеси, что компенсирует малое количество летучих в тощем угле.

Применяемая физико-математическая модель пространственного турбулентного течения, процессов тепломассопереноса и горения твердого распыленного топлива в топочных устройствах ТЭС сформулирована (см. [3-4]) на основе смешанного эйлеро-лагранжева описания двухфазной среды. В этой модели учитываются все основные взаимосвязи процессов переноса за счет турбулентной аэродинамики, межфазного взаимодействия, химического гетерогенного и газофазного реагирования, лучистого теплообмена, а также полидисперсность угольного топлива. В проведенных расчетах при комбинированной подаче угля и газа (в качестве которого в моделировании принят метан CH_4) в топке ВТ2В суммарная мощность тепловыделения в топочном объёме принята равной 75 МВт, в т.ч. за счёт горения угольного топлива – 50 МВт, и за счёт горения газа – 25 МВт (с подачей газа через верхнюю горелку дополнительного дутья с расходом метана 0.5 кг/с). Соответствующий расход тощего угля – 2.25 кг/с, тонина его помола R_{90}=15%. Коэффициент избытка воздуха в топке был принят равным 1.2. Расчеты выполнены с использованием CFD-пакета FLUENT.

В результате численного исследования процессов тепломассопереноса и горения при комбинированном сжигании пылеугольного и газового топлива в вихревой топке ВТ2В получена и проанализирована предсказательная информация об аэротермохимической структуре двухфазного реагирующего течения в топочном объеме, получены теплотехнические и экологические показатели топки ВТ2В в режиме совместного сжигания распыленного тощего угля марки «Т» и природного газа, в т.ч. уровень эмиссии NOx составил 240 мг/нм^3.

Список литературы:

1. Саломатов В.В. Природоохранные технологии на тепловых и атомных электростанциях. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006.
2. Котлер В.Р. Специальные топки энергетических котлов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 104 с.
3. Krasinsky D.V., Sharypov O.V. Numerical modeling of pulverized coal combustion in the vortex furnace with dual upper-port loading // J. Engng. Thermophys. 2015. Vol. 24, No. 4. P. 348-356.
4. Красинский Д.В., Саломатов В.В., Ануфриев И.С., Шарыпов О.В., Шадрин Е.Ю., Аникин Ю.А. Моделирование топочных процессов при сжигании распыленного угля в вихревой топке усовершенствованной конструкции. Часть 2. Горение бурого угля КАБ в вихревой топке // Теплоэнергетика. 2015. № 3. С. 54-61.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН

УДК 544.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ, ГОРЕНИЯ И ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ КОМПОЗИТНОГО ТОПЛИВА ИЗ ОПИЛОК И АНТРАЦИТА

Кузнецов А.В., Шадрин Е.Ю.

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

К настоящему моменту наблюдается ситуация, когда прогресс в инженерии для создания горелочных устройств превосходит технологии получения топлива для новых энергоустановок. Например, имеется эффективное оборудование для сжигания мелкодисперсного топлива, способное эффективно утилизировать даже лигнин, который является самым крупнотоннажным и проблемным отходом целлюлозно-бумажных производств [1]. Однако процессы подготовки топлива часто ограничиваются энергозатратным измельчением или увеличением калорийности топлива за счет добавления мазута, отработанного масла или микроугля.

Возможность совместного сжигания угля и биомассы, известного как co-firing, является перспективным процессом в теплоэнергетике. Европейские страны уже используют этот метод, который позволяет утилизировать сельскохозяйственные отходы без значительных модификаций в энергоустановках. Одним из важных преимуществ совместного сжигания является увеличение КПД процесса. Например, если КПД сжигания биомассы без угля составляет 16–20%, то при их совместном использовании можно достичь значений 35–40% [2]. Добавление 5–10% биомассы к угольному топливу обычно не требует дополнительной модификации энергетического оборудования [3].

Для исследований были привлечены отходы деревообрабатывающих предприятий города Новосибирска, образующиеся в больших объемах, а именно опилки сосны, и продукты углеобогащения компании "Сибантрацит", обладающие низкой реакционной способностью, что делает их трудновоспламеняемыми.

Исследования проводились по трем методикам:

- Исследование процесса термоокислительной деструкции с регистрацией массы образца в реальном времени;
- Исследование времени задержки вспышки навески образца, впрыснутой сжатым воздухом в разогретый объем;
- Исследование горения вихревого факела пылевоздушной смеси.

На рисунке 1 приведены кривые термического разложения, черные кривые – композит, красная – смесь. Соотношение исходных компонент в образцах 50% на 50%. Процесс термического разложения можно разделить на несколько основных этапов: 300–360 °C выход летучих, 380–520 °C разложение коксового остатка и реакция активных центров с кислородом, стоит отметить, что эти 2 процесса в композите объединены в отличие от смеси, третий этап разложение углеродной части антрацита 520-680 °C.

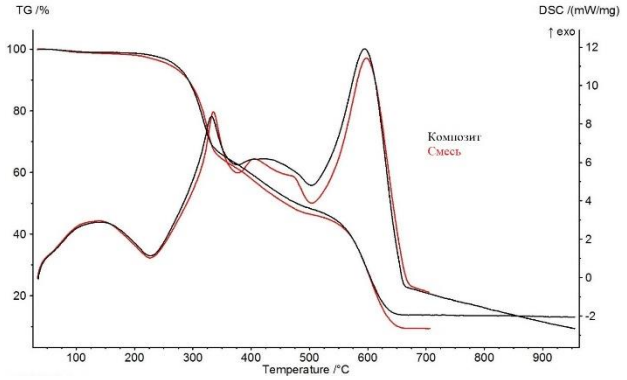


Рис 1. Процесс термического разложения композита и смеси.

Результаты исследования задержки вспышки, проведенные на вертикальной трубчатой печи, приведены на рисунке 2. Время вспышки композита ниже, чем у смеси, что говорит об неаддитивном сложении свойств, кроме того, добавление угля к опилкам снижает время вспышки по сравнению с чистыми опилками, это происходит из-за реакции кислорода и радикальных центров на поверхности угля.

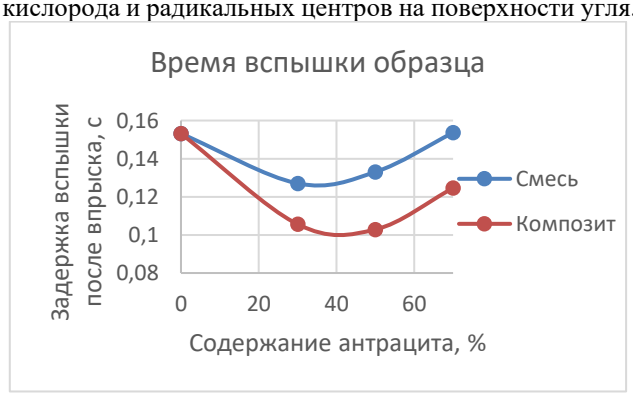


Рис 2. Время задержки вспышки экспериментальных образцов.

Исследование показали влияние смешения и композитообразования низко реакционного типа угля и высокореакционной биомассы.

Список литературы:

1. Berglin N, Tomani P, Salman H, Svard SH, Amand L-E. Pilot-scale combustion studies with kraft lignin in a powder burner and a CFB boiler // TAPPI Journal, 2010; 9(6): 24-30.
2. Grass S. W., Jenkins B. M. Biomass fueled fluidized bed combustion: Atmospheric emissions, emission control devices and environmental regulations // Biomass and Bioenergy, 1994; 6: 243-260.
3. Van Loo S., Koppejan J. Handbook of Biomass Combustion and Co-firing. – UK: Earthscan, 2008. - 348 p.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-79-01191)

УДК 536.2

МАССОПЕРЕНОС В ЛОКАЛЬНОЙ РАБОЧЕЙ ЗОНЕ С ГАЗОВЫМ ИНФРАКРАСНЫМ ИЗЛУЧАТЕЛЕМ И СИСТЕМОЙ ВОЗДУХООБМЕНА ПРИ НАЛИЧИИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ИСТОЧНИКА АНТРОПОГЕННОГО ГАЗА.

Борисов Б.В., Кузнецов Г.В., Максимов В.И., Нагорнова Т.А., Салагаев С.О., Салихов Ф.Ю.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

e-mail: elf@tpu.ru

Применение в промышленных помещениях достаточно современных и экономичных систем поддержания регламентных температур, таких как газовый инфракрасный излучатель (ГИИ), сопряжено с рядом проблем [1]. Например, работа ГИИ светлого типа вследствие открытого горения газа приводит к выбросам продуктов сгорания (в основном CO2, H2O) в окружающую среду [1]. В дополнение к этому в производственном помещении есть дополнительные источники загрязнения воздуха, вследствие чего целесообразным становится установка в помещении системы принудительного воздухообмена. Поэтому при формировании регламентных условий в локальной рабочей зоне руководствуются соответствующими нормами и правилами, в соответствии с которыми важным определяющим фактором является не только температура, влажность и скорость перемещения воздуха, но и его загрязненность [2]. Контроль концентраций углекислого газа в локальной рабочей зоне является весьма актуальной задачей.

Теоретический анализ процессов массопереноса проводился путем численного моделирования. Задача решена в плоской постановке для области, схематично представленной на рис. 1.

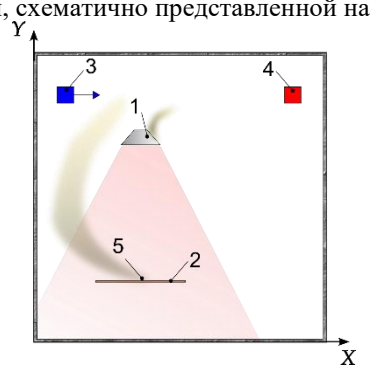


Рисунок 1 – Схема области решения: 1 – газовый инфракрасный излучатель, 2 – источник антропогенного газа, 3, 4 – области притока и оттока воздуха системы воздухообмена, соответсвенно,5 – горизонтальная панель, имитирующая оборудование.

Математическое моделирование конвективно-кондуктивного переноса теплоты и массы в области решения задачи проведено с использованием расчетных модулей пакета COMSOL Multiphysics: «The Heat Transfer I Fluids Interface», «The Turbulent Flow, k-ε Interface», модуля «Transport of Concentrated Species». Параметры радиационного теплового потока, особенно важного при моделировании работы ГИИ, вычислялись модулем «Surface-to-Surface Radiation» в рамках зональной модели по средним угловым коэффициентам [3].

Основные параметры помещения и ГИИ принимались аналогичными использованным в предыдущих исследованиях авторов, например, [1] и соответствовали реальным объектам.

Как показывает анализ результатов численного моделирования квазистационарная гидродинамическая картина течения устанавливается примерно к 40-60 минутам от начала работы системы нагрева и во многом определяется параметрами работы систем создания регламентных условий и воздухообмена.

Установлено, что выделяемый из локального источника загрязнения антропогенный газ вследствие

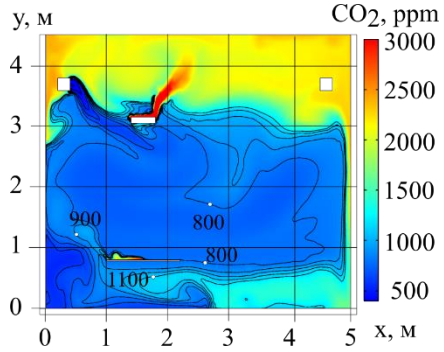


Рисунок 2 – Поле концентрации CO_2, сформированное к 60 минуте работы ГИИ.

сформировавшихся циркуляционных течений в помещении перемещается из локальной рабочей зоны в левую часть помещения, а затем проходя вдоль левой стены устремляется вверх, где выводится из помещения через канал отвода воздуха системы воздухообмена (рис. 2). Также проведён сравнительный анализ распространения антропогенного газа в помещении в зависимости от интенсивности локального источника газовыделения и различной интенсивности источников тепловой энергии, используемых при создании регламентных условий для работающего персонала. Особое внимание уделено анализу формирования микроклимата в локальных рабочих зонах. На основании обобщения полученных результатов сформулированы предложения для практики проектирования систем формирования регламентного режима локальных рабочих зон.

Список литературы

1. Maksimov V.I., Nagornova T.A., Kurilenko N.I., Voloshko I.V. Heat transfer under conditions of operation of a gas infrared emitter and an air exchange system // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. 2021. Vol. 332. № 9. P. 128-141.
2. ГОСТ Р 59972-2021 Системы вентиляции и кондиционирования воздуха общественных зданий.
3. Russell, J. Comsol Multiphysics / J. Russell, R. Cohn. – Scotland, United Kingdom: Lennex Corp, 2012. 79 p.

Работа поддержана РНФ (грант № 20-19-00226 П).

УДК 621.039

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В МОДЕЛИ ПЕРИФЕРИЙНОЙ ОБЛАСТИ ТВС С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Лобанов П.Д., Светоносов А.И., Токарев М.П.

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

Повышение эффективности и безопасности АЭС возможно за счет оптимизации конструкций существующих энергоблоков АЭС на тепловых нейтронах и создания нового типа реакторов на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем. Для совершенствования ядерно-энергетических комплексов нового поколения необходимы детальные измерения локальных гидродинамических характеристик и теплообмена в элементах АЭС. В связи с тем, что проведение подобных экспериментов для реальных энергоблоков невозможно, требуется проведение модельных экспериментов.

В данной работе создан циркуляционный стенд для изучения закономерностей течения жидкометаллического теплоносителя (свинец-висмут) в модельной сборке стержней, состоящей из трех электрически обогреваемых имитаторов ТВЭЛов, расположенных в ряд. Стенд оснащен циркуляционным насосом, расходомером, подводящими линиями и рабочим участком. Расход теплоносителя контролировался с помощью изменения частоты электродвигателя, вращающего насос.

Для поддержания температуры элементов стенда, он был помещен в изолированный объем, в котором с помощью электрообогреваемых тэнов поддерживалась постоянная температура (T=150 °C).

Схема рабочего участка представлена на рисунке 1. Для уменьшения тепловых потерь имитаторы ТВЭЛов 1 были помещены в корпус из теплоизоляционного материала 2. Имитаторы ТВЭЛов оснащены индивидуальными источниками электропитания, что позволяет провести исследования при неравномерном энерговыделении в соседних ячейках. Диаметр каждого имитатора ТВЭЛов D=10 мм, расстояние между ними S=14 мм.Для подачи электрической мощности использовался источник питания WSD-20H50 (до 10000 Вт). Это позволяет определить некоторые закономерности межканального обмена, контролируя распределение температуры в потоке и на стенке рабочего участка.

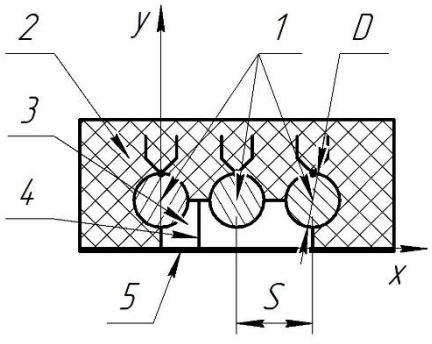


Рис. 1. Схема рабочего участка: 1 – ТВЭЛы; 2 – теплоизолятор; 3 – сечение канала; 4 – линия смещения термопары; 5 – фольга из нержавеющей стали.

Эксперименты проводились в турбулентном режиме течения теплоносителя. Поток жидкости был организован в сечении рабочего участка 3. Ряд контрольных экспериментов был проведен в неподвижной жидкости.

Для предотвращения перегрева имитаторов ТВЭЛов их температура в области, не омываемой потоком жидкости, контролировалась с помощью индивидуальных термопар. Эти три термопары были подключены к промышленному контроллеру ТРМ-138. Положения термопар показаны на рис. 1.

Температура внешней стенки рабочего участка измерялась с помощью инфракрасной камеры Fluke T32. Тепловизор устанавливался на штатив. Внешняя стенка рабочей секции 5 была изготовлена из фольги из нержавеющей стали. Толщина стенки 0,3 мм. Внешняя поверхность была окрашена черной матовой краской. Чтобы фольга не прогибалась потоком теплоносителя, штатно устанавливались ребра толщиной 36 мм. Размер области измерения тепловизора 35x28 мм. Центр области измерений располагался на расстоянии 400 мм от оси входного коллектора.

Измерения профилей температуры производились с помощью термопары внешним диаметром 1 мм и электроизолированным спаем. Применялась термопара хромель-алюмель (тип К). Перемещение термопары в сечении рабочего участка производилось с помощью координатного устройства. Ручка управления координатным устройством была выведена за пределы обогреваемого объема.

Эксперименты со свинцово-висмутовым теплоносителем были проведены при числах Рейнольдса потока, определенного по гидравлическому диаметру Re = 5000, 10000, 13800. Дополнительно были проведены экспериментальные исследования с использованием воды при Re = 5000 и 10000. При проведении экспериментов для воды и жидкометаллического теплоносителя поддерживались температуры 25 и 150 °C соответственно.

Получены данные о закономерностях распределении температуры тонкой стенки рабочего участка и жидкометаллического теплоносителя при течении в трехстержневой модели ТВС. Дополнительные эксперименты были проведены с использованием воды в качестве рабочей жидкости.

Измерения проведены при варьировании расходов теплоносителей (до Re = 13800), мощности обогрева имитаторов ТВЭЛов (до 4 кВт/м) и при специальным образом организованном неравномерном обогреве имитаторов ТВЭЛов.

Полученные данные могут быть использованы для верификации расчетных кодов, основанных на методах машинного обучения.

Работа проведена при поддержке гранта РНФ 22-19-00587

УДК 621.039

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОТОКА И ВИБРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПРОДОЛЬНОМ ОБТЕКАНИИ ГИБКОГО СТЕРЖНЯ

Прибатурин Н.А., Евдокименко И.А., Лобанов П.Д., Светоносов А.С., Щепихин И.В.

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

Течение жидкости приводит к возникновению гидродинамических сил, которые могут приводить к вибрации конструкций. Взаимодействие жидкость - твердое тело является активно развивающейся областью механики. Вибрационные нагрузки могут приводить к возникновению потенциально опасных ситуаций, например, фреттинг коррозии твэлов или теплообменных трубок в парогенераторах энергетических установок [1]. Такие нагрузки могут привести к повреждению элементов контура реакторной установки [2-4].

В настоящее время отсутствует общепринятая физическая модель колебаний сборки вертикальных стержней в продольном потоке жидкости и основанное на ней математическое описание процесса. Расчет колебаний стержней требует совместного анализа их жесткости, способа крепления и позиционирования друг относительно друга. Экспериментальные исследования до сих пор остаются практически единственным детальным способом изучения характеристик динамического отклика пучка стержней на воздействие потока жидкости. Экспериментальным и теоретическим исследованиям вибраций тел, обтекаемых потоком, посвящен ряд работ. Обзоры по данной тематике приводится в монографиях [5-7].

Цель данной работы - выполнение экспериментальных исследований по устойчивости имитатора твэла в потоке теплоносителя, получение данных об эволюции локальных гидродинамических параметров вдоль имитатора твэла. Получение данных по вибрации имитатора твэла и мод его колебаний в зависимости от длины имитатора твэла и расхода теплоносителя.

Рабочий участок представляет собой цилиндрический канал с внутренним диаметром 26 мм. По оси канала расположен стержень, выполненный в виде трубки диаметром 12 мм. Материал трубки - стержня Д16Т, толщина материала трубки однородна по высоте и равна 1 мм. Верхний торец трубки заглушен конической пробкой, второй конец трубки был выведен через штуцер за пределы рабочего участка и был открыт. Имеющий такой вид стержень центрировался относительно цилиндрического канала решеткой из алюминия, к которой был в свою очередь приварен. Толщина материала решетки 2 мм, высота 5 мм. Для обеспечения консольного расположения стержня при ее обтекании продольным потоком жидкости он был закреплен в канале в двух местах: с помощью центрирующей решетки и прижимной гайки на входном коллекторе. Длина свободной части трубки была 200-800 мм.

С помощью современных лазерных методов исследования (ЛДИС, PIV), проведены исследования локальной гидродинамической структуры в кольцевом канале с консольно-закрепленным центральным стержнем. Получены данные об эволюции гидродинамических параметров потока вдоль стержня и вблизи его кончика (в зависимости от его формы). Получены данные об осредненных, пульсационных и спектральных параметрах течения. Показано, что в спектре скорости наблюдается выделенная частота, соответствующая частоте колебаний стержня.

На основе метода машинного зрения и обработки изображений выполнено экспериментальное исследование колебаний консольно-закрепленного стержня - имитатора твэла в кольцевом канале в продольном восходящем потоке жидкости.

На основе анализа полученных данных продемонстрирована перспективность использования, предложенного электроимпедансного метода измерения для экспериментальных исследований колебаний в потоке жидкости конструктивных элементов энергетических реакторов.

Полученные данные могут быть использованы для верификации связанных расчетных методов гидродинамики и механики конструкций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Assessment of CFD Codes for Nuclear Reactor Safety Problems - revision 2, NEA, CSNI, 12 (2014).

2. M. Pettigrew, C. Taylor, N. Fisher, M.Yetisir, B.A.W.Smith. Flow-induced vibration: recent findings and open questions // Nuclear Engineering and Design. 1998. Vol. 185. P. 249–276.

3. Shin Y., Wambsganss M. Flow-induced vibration in LMFBR steam generators: a state-of-the-art review // Nuclear Engineering and Design. 1977. Vol. 40. P. 235–284.

4. Paidoussis M. Real-life experiences with flow-induced vibration // Journal of fluids and structures. 2006. Vol. 22. P. 741–755.

5. Nakamura T., Kaneko S., Inada F., Kato M., Ishihara K., Nishihara T., Mureithi N., Langthjem M. Flow-induced vibrations classifications and lessons from practical experiences, Elsevier, Second Edition, 2014. 432 p.

6. Paidoussis M.P. Fluid-structure interactions: slender structure interactions and axial flow. Volume 1, Academic press, 1998. 572 p.

7. Paidoussis M. P. Fluid-structure interactions: slender structure interactions and axial flow. Volume 2, Academic press, 2004. 942 p.

УДК 621.9

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОПОЧНОГО УСТРОЙСТВ ПРИ СЖИГАНИИ ПЫЛЕВИДНОГО ТОПЛИВА НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Мальцев К.И[1]., Гиль А.В[1].

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

Эффективность топочной камеры котла на ТЭС имеет решающее значение для экономичного и экологически безопасного сжигания топлива. Она зависит от правильной организации аэродинамической структуры потока воздуха, которая обеспечивает оптимальные условия для горения и минимизирует тепловые потери. В частности, тангенциальная компоновка, создает вихревой поток, который централизует высокие температуры в середине камеры, снижая риск перегрева стенок. Это позволяет более эффективно использовать топливо, сокращает образование вредных выбросов и улучшает общую производительность станции [1].

В топочных камерах с поперечным сечением в виде квадрата ядро горения располагается в центре топки. При увеличении какой-либо из сторон появляется риск прямого воздействия на экраны.

Применение тангенциальной компоновки в таких топках не исключение, например в паровом котле БКЗ-220-100 топочная камера прямоугольного сечения 6656х9536 (рис. 1). В исследованиях [2] выявлено, что из-за прямоугольного сечения топки, вихрь имеет ассиметричную структуру из-за сносящего потока от крутонаправленных струй.

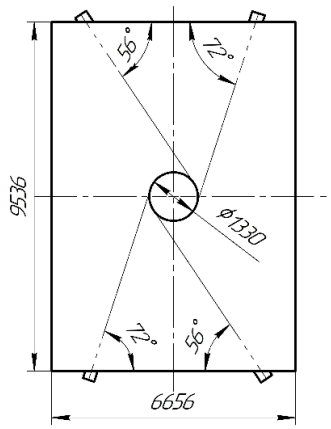


Рис. 1 – Поперечный разрез топочной камеры котла БКЗ-220-100Ф

В данной работе представлены рекомендации по повышению эффективности пылеугольного котла с тангенциальной компоновкой горелочных устройств, направленные на повышение надежности работы экранных поверхностей и снижения выбросов вредных веществ.

Для анализа топочных процессов выполнены численные исследования.

В работе [3] с целью снижения температур в пристеночном слое топочных экранов, предложен вариант установки дополнительных сопел на отметке 4325 мм на фронте и тыле. Через сопла прямоугольного сечения 500х250 мм со скоростью 50 м/с осуществляется подача вторичного воздуха в размере 20 % от теоретически необходимого (рис. 2). Применение сопел способствовало снижению уровня температур вблизи экранов топки, что положительно влияет на надежность работы котельного агрегата.

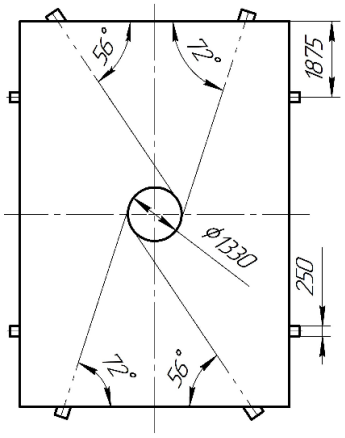


Рис. 2 – Расположение сопел на фронтовом и тыльном экранах топки

В данном работе проведен анализ влияния геометрического расположения сопел на топочные процессы, а также снижение выбросов вредных веществ при применении третичного дутья.

В результате численного моделирования получены траектории движения частиц, распределения температур, концентраций продуктов горения и др. в объеме топочной камеры.

При анализе результатов моделирования выявлено, что применении сопел третичного дутья способствует снижению выбросов вредных веществ (оксидов азота). Даны рекомендации по установке дополнительных сопел для устранения наброса факела на топочные экраны.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ (проект № 23-29-00274).

Список литературы:

1. Хзмалян Д.М., Каган А.Я. Теория горения и топочные устройства. М.: Энергия, 1976. 488 с.
2. Мальцев К.И., Гиль А.В., Заворин А.С., Лебедь Д.В. Численное исследование топочных процессов при сжигании непроектных углей в котле паропроизводительностью 220 т/ч // Теплоэнергетика. 2022. №12. С. 73-83.
3. Мальцев К.И., Гиль А.В., Н.В. Абрамов, С.А. Пузырев. Численное моделирование тангенциальной схемы сжигания в камерной топке // Борисовские чтения: Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Красноярск, 25–26 октября 2023 года. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2024. – С. 194-199.

УДК 620.9

АНАЛИЗ ОРГАНИЧЕСКОГО ЦИКЛА РЭНКИНА ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ВОДЫ (70÷100 °С)

Степанов К.И.[1], Садкин И.В.[1], Мухин Д.Г.[1], Алексеенко С.В.[1]

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

Геотермальная энергия, наряду с солнечной, рассматривается в числе наиболее перспективных возобновляемых источников энергии в будущем [1, 2].

Геотермальная вода с температурой выше 70 °С (или вода техногенного происхождения) имеет потенциал для выработки электроэнергии путём реализации органического цикла Рэнкина (ОЦР).

Основной задачей при проектировании и подборе оборудования для ГеоЭСявляется оптимальныйвыбор органического рабочего тела (ОРТ) для реализации ОЦР.

Настоящая работа посвящена расчетно-аналитическому обоснованию выбора ОРТ в условиях греющего источника, имеющего температуру до 100 °С.Обоснование приводится с учётом законодательных ограничений по воздействию на окружающую среду и человека, необратимых потерь в аппаратах, достижимой температуры конденсации, конструктивных особенностей расширительного устройства (турбина, турбодетандер), доступности ОРТ в современных реалиях, учетом удельного потребления на собственные нужды в зависимости от эффективности цикла и др.

Одной из основных качественных характеристик ОРТ при низких температурах является наклон правой пограничной кривой T-sдиаграммы.

Выделяют три типа кривых в координатах «температура-энтропия» (T-S): «сухая» (dry) жидкость с положительным наклоном кривой справа; «мокрая» (wet) жидкость с отрицательным наклоном, dS/dT< 0; изэнтропическая жидкость с бесконечно большим наклоном, dT/dS → ∞ (см. рис. 1)

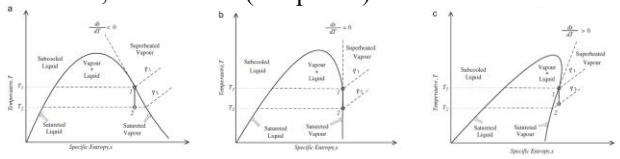


Рис. 1 Типы кривых насыщения

В условиях ограниченных температур теплоносителя рекомендуется избегать применения фреонов с отрицательным наклоном правой пограничной кривой (см. рис. 2).

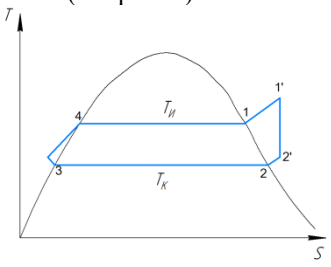


Рис. 2 Действительный цикл при работе с перегревом пара ОРТ

Это позволяет избежать применения пароперегревателя, максимально приближать температуру кипения к температуре греющего источника без поправки на необходимость перегрева, избегать эрозионного износа элементов расширительного устройства при работе на неустановившихся или аварийных режимах работы ГеоЭС.

Предельное увеличение температуры кипения ОРТ возможно лишь в условиях неограниченного дебита скважины, однако на практике требуется или минимизация дебита или его обоснованная величина. Таким образом, при фиксированной температуре конденсации, одной из задач является итерационное обоснование оптимальной температуры кипения ОРТ.

Задача конструкторского (а затем – поверочного расчёта) ГеоЭС в целом и её отдельных теплообменных аппаратов – многопараметрическая. Не существует ни одного свойства ОРТ, свидетельствующего о его однозначной пригодности в конкретных условиях эксплуатации.

Существуют лишь свойства, свидетельствующие о непригодности ОРТ: ненулевой ODP, высокий GWP, токсичность, термическая или химическая нестабильность.

Окончательное решение принимается по технико-экономическим показателям (ТЭП) и доступности ОРТ на рынке.

Оценка ТЭП проводится путём расчета электрической мощности (нетто), для чего следует учитывать собственное потребление на собственные нужды ГеоЭС. Это возможно при правильно задании необратимых потерь на каждом отдельно взятом теплообменном аппарате (температурные напоры, гидравлическое сопротивление, температурные перепады, влияющие на расход внешнего теплоносителя).

Корректное задание необратимых потерь важно также и с точки зрения конечной металлоёмкости тепломеханического оборудования, что влияет на величину капитальных затрат и срок окупаемости – основным ТЭП.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН (№ 121031800229-1)

Список литературы:

1. Алексеенко С.В., Бородулин В.Ю., Гнатусь Н.А., Низовцев М.И., Смирнова Н.Н. Проблемы и перспективы развития петротермальной энергетики. Теплофизика и Аэромеханика (2016)
2. Алхасов А.Б. Геотермальная энергетика. Проблемы, ресурсы, технологии. М.: Физматлит, 2008. 375 с.

УДК 621.9

ПОИСК РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ НИЗКОЭМИССИОННОГО СЖИГАНИЯ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ ПРИ ПОДАЧЕ ОКИСЛИТЕЛЕЙ-РАЗБАВИТЕЛЕЙ

Мухина М.А.[1], Садкин И.С.[1,2], Копьев Е.П.[1], Шадрин Е.Ю.[1]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] Новосибирский государственный технический университет,
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Актуальной научно-технической проблемой, решение которой имеет принципиальное значение для создания и развития перспективных технологий производства энергии и двигателестроения, является выявление закономерностей, управляющих характеристиками горения, в том числе, жидкого органического топлива. В ИТ СО РАН предложен и успешно апробирован новый способ низкоэмиссионного сжигания жидких углеводородных топлив при распылении струей перегретого водяного пара (Steam injection method) [1]. Этот способ имеет ряд преимуществ, таких как снижение концентрации вредных веществ в дымовых газах, высокая полнота сгорания, возможность распыления и сжигания в том числе некондиционных горючих веществ. Вместе с этим, существуют другие эффективные подходы для снижения вредных выбросов при сжигании топлива, основанные на использовании газов разбавителей (напрмиер Flue gas recirculation), а также сжигания с повышенным содержанием кислорода (Oxi-fuel combustion).

Целью настоящей работы является определение режимных параметров устойчивого горения дизельного топлива с низкими выбросами CO и NOx и экспериментальное (лабораторное) определение границ срыва пламени в условиях совместного впрыска пара и газов окислителей-разбавителей в зону горения.

Для проведения исследования использовалось горелочное устройство с распылением топлива струей перегретого водяного пара и системой принудительной подачи газов разбавителей-окислителей в камеру газогенерации (см. рис. 1).

Рис. 1. Схема горелочного устройства

Более подробное описание горелочного устройства приведено в работе [2].

В качестве газов окислителей-разбавителей использовались CO_2, N_2 и O_2. В качестве топлива использовано стандартное дизельное топливо. В ходе эксперимента фиксировались следующие режимные параметры: расход топлива 1 кг/ч и расход водяного пара 0.8 кг/ч. Остальные режимные параметры устойчивого горения дизельного топлива с низкими выбросами CO и NOx были определены при предварительном расчете и проведение экспериментальных исследований, их значения показаны в таблице 1.

Таблица 1. Найденные режимные параметры

Номер режима:	1	2	3	4	5	6	7
Расход воздуха, кг/ч	4,5	4,5	4,5	-	-	-	-
Расход кислорода, кг/ч	-	-	-	0,95	0,95	0,95	0,95
Расход азота, кг/ч	-	-	0,77	-	1,75	-	0,95
Расход диоксида углерода, кг/ч	-	0,7	-	1,75	-	0,95	-

Помимо этого, для найденных режимов было проведено измерение профиля средней температуры пламени вдоль вертикальной оси сопла горелочного устройства. Измерения проведены с помощью платинородий-платинородиевой термопарой типа B, при обработке данных учитывалась поправка на излучение для круглых термопар [3].

Таким образом, в ходе работы найдены режимные параметры для низкоэмиссионного сжигания жидких углеводородов и получены новые экспериментальные данные о температуре пламени при совместном добавлении газов окислителей-разбавителей и впрыске пара в камеру газогенерации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ № 23-79-10029.

Список литературы:

1. Anufriev I.S. Review of water/steam addition in liquid-fuel combustion systems for NOx reduction: Waste-to-energy trends // Renew Sustain Energy Rev. 2021. Vol. 138. P. 110665.
2. Anufriev I.S., Kopyev E.P., Alekseenko S.V., Sharypov O.V., Vigriyanov M.S. New ecology safe waste-to-energy technology of liquid fuel combustion with superheated steam // Energy. 2022. Vol. 250. P. 123849.
3. Kaskan W.E. The dependence of flame temperature on mass burning velocity // Symp. Combust. 1957. Vol. 6, № 1.

УДК 697.921.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНО-КОЛОНОЧНОГО ВОЗДУШНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА С КАПЕЛЬНЫМ ОРОШЕНИЕМ И ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Низовцев М.И.[1], Летушко В.Н.[1], Стерлягов А.Н.[1]

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

Анализ вопросов вентиляции помещений показывает, что до 90% энергозатрат при вентиляции может быть сохранено при использовании рекуперативных и регенеративных теплообменников [1, 2]. Сложность решения вопросов воздушной регенеративной и рекуперативной вентиляции вызвана низкими коэффициентами теплообмена между воздушной средой и поверхностью твердого тела, что приводит к протяженным теплообменным поверхностям и значительным габаритам теплообменных аппаратов. Эффективность используемых конструкций воздушных регенераторов тепла недостаточно высока, кроме того, существенным недостатком известных устройств является и то, что они надежно работают только при относительно высоких температурах наружного воздуха. Для повышения эффективности существующих теплообменников и создания принципиально новых устройств, необходимо простые и эффективные модели теплофизических процессов, верификация которых требует наличие обширной базы экспериментальных данных.

Перспективными устройствами регенеративной вентиляции являются регенераторы с использованием промежуточного теплоносителя. В качестве преимуществ данного типа регенераторов можно отметить возможность разнесения приточного и вытяжного вентиляционных каналов [3-5].

Для повышения энергетической эффективности устройств утилизации тепла и холода вентиляционного воздуха в лаборатории термогазодинамики ИТ СО РАН выполняются работы по исследованию воздушных теплообменников с капельным орошением и промежуточным теплоносителем. Такие аппараты не подвержены обмерзанию и могут надежно работать в холодных климатических условиях, а также позволяют повышать влажность поступающего в помещение воздуха в холодный период года. В 2023 году получен патент на изобретение «Регенератор тепла и холода вентиляционного воздуха» [6]. Разработана и изготовлена новая лабораторная модель одно-колоночного теплообменного аппарата.

В качестве промежуточного теплоносителя в теплообменнике использовался 30% раствор $CaCl_2$. При проведении экспериментов расходы потоков воздуха из помещения и улицы были одинаковы, G_v=130 м^3/ч. Расход промежуточного теплоносителя варьировался от G_w=60 л/ч до 80 л/ч.

На рис.1 показана, тепловая эффективность нагрева воздуха. Она составила для расхода теплоносителя G_w=80 л/ч, ε_t = 68,4%, а для расхода G_w=60 л/ч, ε_t = 62,1%.

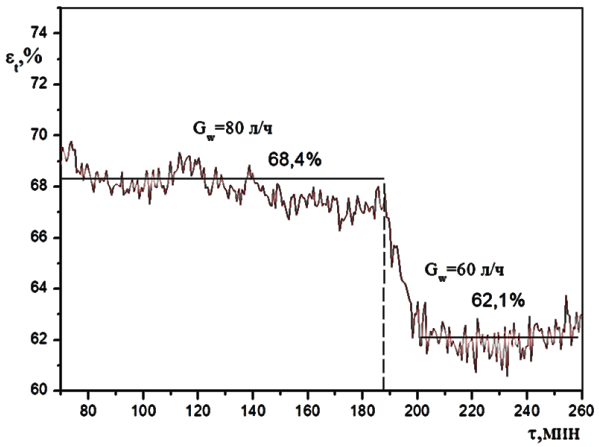


Рис.1. Тепловая эффективность нагрева воздуха.

Важная особенность работы данного теплообменника заключается еще и в том, что он позволяет помимо регенерации тепла вентиляционного воздуха повышать еще и влажность поступающего в помещение воздуха, что важно в регионах с холодным климатом, так как наружный воздух в них имеет низкую влажность в зимнее время.

Согласно результатам экспериментов, средняя влажностная эффективность составила при нагреве воздуха для расхода промежуточного теплоносителя G_w=80 л/ч, ε_w = 81,7%, а для расхода G_w=60 л/ч, ε_w = 76,9%.

Работа выполнена по государственному заданию ИТ СО РАН № 121031800217-8.

Список литературы:

1. Bai H. Y. et al. A review of heat recovery technologies and their frost control for residential building ventilation in cold climate regions//Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022. Т. 162. С. 112417.
2. Picallo-Perez A. et al. Ventilation of buildings with heat recovery systems: Thorough energy and exergy analysis for indoor thermal wellness// Journal of Building Engineering. 2021. Т. 39. С. 102255.
3. Бородулин В.Ю., Низовцев М.И. Моделирование регенеративного воздушного теплообменника с промежуточным теплоносителем// Ползуновский вестник. 2015. Т. 1. № 4. С. 32-38.
4. Shodiyev B. et al. A review of heat recovery technology for passive ventilation applications// E3S Web of Conferences. EDP Sciences. 2023. Т. 434. С. 01034.
5. Guschin I. A. Improving the efficiency of energy saving through the use of thermal energy//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing. 2023. Т. 1212. №. 1. С. 012003.
6. Патент № 2789397 по заявке № 2022119793 от 20.07.2022. Регенератор тепла или холода вентиляционного воздуха, авторы Летушко В.Н., Низовцев М.И., Огородников И.А, патентообладатель: ФГБУН ИТ СО РАН.

НИЗКОКИПЯЩИЕ РАБОЧИЕ ЖИДКОСТИ В ОСНОВЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Огуречников Л.А.

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

В 1962 году С.С.Кутателадзе (Институт теплофизики СО АН СССР) предложил на базе низкотемпературных геотермальных источников Камчатки применить двухконтурную схему с низкокипящм веществом для выработки электроэнергии. Институт теплофизики СО РАН СССР на протяжении трех лет проводил работы по созданию и исследованию опытной хладоновой энергетической турбоустановки.

Стремление использовать неводяные пары в качестве рабочих тел тепловых двигателей возникали на всех этапах развития теплоэнергетики. В 1967 году в СССР впервые в мире была реализована идея применения неводяных паров для выработки электроэнергии по полной технологической схеме на Паратунской геотермальной опытно-промышленной электростанции. В течение 1967-1974 гг. на Камчатке в лаборатории натурных испытаний Института теплофизики СО РАН СССР проводились эксплуатационные исследования хладоновой установки (УЭФ-90/0,5). Всего в процессе испытаний УЭФ-90/0,5 отработала 7200 часов, в т.ч. 5050 часов в промышленном режиме. Успешные работы по использованию низкокипящего вещества (R-12) на Паратунской геотермальной электростанции расширили область эффективного преобразования тепловой энергии низкого потенциала в электрическую, позволили повысить глубину использования теплоты энергоресурсов. В настоящее время мире эта технология стала прототипом для более 400 ГеоЭС в мире. Полученный результат позволяет повысить конкурентность технологии реализации подземного тепла сухих горячих пород Земли. В решении этой проблемы по разработке и созданию возобновляемого источника энергии имеет место два основных аспекта – создание подземного котла с циркуляционной системой движения теплоносителя и разработка наземного энергоблока для преобразования этой теплоты в другие виды энергии. Рассматриваются полученные результаты исследований в этом направлении.

УДК 621.432

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ И АЭРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ДВИГАТЕЛЯХ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Гуреев В.М.[1], Попов И.А.[1], Гуреев М.В.[1], Попов И.А.[2], Жукова Ю.В.[3], Чорный А.Д.[3]

[1] Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ,
420111, Россия, Республика Татарстан, Казань, ул. К. Маркса, 10

[2] Казанский государственный аграрный университет,
420015, Россия, Республика Татарстан, Казань, ул. К. Маркса, 65

3 Институт тепло- и массообмена им.А.В.Лыкова НАНБ,
220072, Республика Беларуси, Минск, ул.П.Бровки, 15

В основе работы лежит концепция создания цифровых двойников узлов, агрегатов и систем, как их цифровой (виртуальной) модели. Цифровые двойники узлов и агрегатов дизельного двигателя состоит из 3D модели, математической модели, описывающей все процессы работы узлов и агрегатов средства, набора режимных параметров и условий эксплуатации, критериев оптимальной эксплуатации [1,2]. Весь набор данных и моделей позволяет точно воспроизводить работу систем двигателя. Перед началом работ с цифровым двойником проводится обязательная верификация его работы в базовой комплектации на номинальных режимах.

Создание 3D модели автотранспортных средств, а также их узлов и агрегатов производится с использованием программного обеспечения Siemens NX, а при моделировании процессов гидрогазодинамики и тепломассопереноса используются программные комплексы Ansys Fluent и CFX.

В работе рассмотрено несколько задач моделирования процессов течения и теплообмена в каналах сложной формы при стационарных и пульсирующих движениях теплоносителей.

Одной из задач являлось численное исследование системы смазки двигателя. Проведены расчетные исследования, определены значения давления и расхода моторного масла по каждому компоненту системы смазки двигателя и всего двигателя в целом. Особое место уделено восстановлению рабочих характеристик героторного насоса системы смазки. Показаны перспективы использования погруженных сеток для моделирования работы насоса. Разработаны технические решения по модернизации системы смазки – увеличение производительности насоса за счет объёмного масштабирования рабочего объёма насоса, оптимизации конструкции клапана регулировки давления.

Цифровой двойник систем впуска рядного 6-ти цилиндрового двигателя разрабатывался с целью определение значения газодинамического сопротивления и характеристики течения газов в системе впуска двигателя, проведения их оптимизации и оценки равномерности распределения заряда по цилиндрам. Предложена конструкция нового впускного патрубка системы впуска двигателя, позволившая снизить сопротивление и выровнять распределение заряда по цилиндрам двигателя.

Проведена оценка теплового состояния двигателя при расчете системы охлаждения. По результатам решения сопряженной задачи гидродинамики, теплообмена и прочности определены локальные температуры всех элементов двигателя, рассчитаны термодеформации в них. Предложены и обоснованы места повышения эффективности системы охлаждения, усиления конструкции двигателя.

Проведено моделирование процессов течения в проточной части турбокомпрессора (ТКР). Выполнено 3D моделирование ТКР, численное восстановление рабочих характеристик ТКР, модернизация конструкции с вводом антипомпажного кольца и изменением проточной части и расчет новым характеристик ТКР. Все решения обоснованы при использовании виртуальных испытаний ТКР.

Проведено численное моделирование теплового состояния двигателя при решении задачи теплообмена и внутренней аэродинамике в подкапотном пространстве. Даны и обоснованы рекомендации по изменению натекания потока на радиатор, работе вентилятора и расположению элементов в подкпотном пространств.

Все работы по созданию цифровых двойников и модернизации конструкций систем на основе анализа процессов аэрогидродинамики и теплообмена также позволили существенно улучшить эксплуатационные характеристики рассматриваемых систем.

Таким образом, цифровой двойник позволяет без натурных испытаний определять рабочие характеристики узлов и систем двигателей транспортных средств, предлагать технические решения по повышению эффективности их работы или масштабированию по развитию техники и обосновывать их на основе виртуальных испытаний.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках Соглашения с Минобрнауки РФ № 075-03-2024-067 от 17.01.2024 г. (шифр FZSU-2023-0004) и в рамках Соглашения о консорциуме между КНИТУ-КАИ и Институтом тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси.

Список литературы:

1. Гуреев В.М., Гортышов Ю.Ф., Попов И.А., Макаров Е.Г., Куликов А.С. Цифровые двойники – основа принятия оптимальных технических решений и повышения финансовой эффективности разработок // Международный форум KAZAN DIGITAL WEEK – 2023: сборник материалов. – Казань: ГБУ «НЦБЖД», 2023. – Ч. 1. – с.313-323.
2. Чорный А.Д., Жукова Ю.В., Баранова Т.А., Кухарчук И.Г., Попов И.А. Опыт создания цифровых двойников для моделирования эксплуатационных режимов транспортных систем // Международный форум KAZAN DIGITAL WEEK – 2023: сборник материалов. – Казань: ГБУ «НЦБЖД», 2023. – Ч. 1. – с.442-450.

УДК 536.468

ОСОБЕННОСТИ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ КОМПОЗИЦИОННОГО ЖИДКОГО ТОПЛИВА

Вершинина К.Ю. [1], Романов Д.С. [1,2], Скорюпин В.В. [1], Стрижак П.А.[1,2]

[1] Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30
[2]Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН»,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1

В настоящее время в мировой энергетике доля энергии, генерируемой при использовании угля, превышает 27%, что является промежуточным значением между долями энергогенерации при использовании нефти (32%) и природного газа (22%) [1]. Ежегодно регистрируется прирост угледобычи [1]. Значительными потребителями угля, как правило, являются электростанции, на которые приходится около 5.2 млрд тонн в год (68.9%) добываемого угля. При этом 1.43 млрд тонн угля в год (18.9%) используется в качестве топлива на малых объектах энергогенерации, 0.9 млрд тонн угля (11.9%) используется при коксовании и только 70 млн тонн (0.3%) подвергается другим видам термохимической переработки, в основном пиролизу и газификации [1]. Это обусловлено тем, что устаревшие технологии ресурсоемкие, что, как следствие, приводит к повышенному потреблению энергоресурсов, а также к загрязнению окружающей среды [2]. В связи с негативным прогнозом истощения энергетических ресурсов [2] актуальна необходимость эффективного использования ископаемых топлив путем совершенствования технологий энергогенерации.

Одним из способов совместного решения энергетических и экологических проблем является конверсия угля, в том числе низкосортного и отходов его переработки. Основными методами термического преобразования для производства энергии, как правило, являются сжигание, газификация и пиролиз [3]. Прямое сжигание считается в настоящее время устаревшей технологий получения энергии в отличие от пиролиза и газификации [1]. При этом существуют альтернативные варианты сжигания угля, одним из которых является замещение ископаемого твердого топлива композиционными жидкими топливами (КЖТ).

Использование таких топливных смесей в качестве альтернативы традиционным источником энергии по сей день является одной из перспективных задач, по расширению сырьевой базы и требует изучения влияния компонентов топливной смеси на состав антропогенных выбросов, генерируемых в процессе сжигания.

Целью работы является изучение особенностей термического разложения компонентов композиционного топлива. В качестве компонентов композиционных топлив использовались каменные угли марок «К» и «СС», бурый уголь марки «Б2». В качестве жидких компонентов использовалось дистиллированное талловое масло, рапсовое масло и отработанное моторное масло. Сырое талловое масло является основным побочным продуктом производства целлюлозы с пользованием древесины хвойных пород деревьев [4]. Сырое талловое масло является недорогим сырьем для производства биотоплив, что делает его применение экономически и экологически оправданным.

Экспериментальная методика предполагала сжигание и пиролиз отдельных компонентов и смеси компонентов композиционных топлив в лабораторном реакторе термохимической конверсии при 300 °C, 600 °C и 1000 °C. Смесевые топлива подготавливались с пользованием магнитной мешалки AIBOTE ZNCLBS–2500 в течение 2–3 мин при скорости вращения магнитного якоря 1500 об/мин. Эксперименты по регистрации газоанализатором концентраций состава дымового газа проводились при сжигании образца топлива массой 0.05–0.25±0.0001 г.

Использование нескольких компонентов в составе смесевого топлива увеличивает концентрации продуктов сгорания в 1.5–2.5 раза по сравнению с концентрациями, выделяющимися при сжигании монокомпонента. Данная особенность обусловлена различием элементного состава используемых образцов топлива, его реакционной способностью и условиями проведения эксперимента.

В настоящей работе определены диапазоны изменения концентраций состава антропогенных выбросов при раздельном и совместном сжигании компонентов композиционных жидких топлив. Полученные результаты позволили оценить вклад каждого компонента КЖТ на состав и концентрации газовых выбросов смесевых топлив, а также определить синергетический эффект от совместного термического разложения смесевых топлив при различных температурных условиях. Результаты исследования могут быть полезны для развития и модернизации технологий сжигания композиционных топлив в топках котельных агрегатов.

Список литературы:

1. Coal Gasification: At the Crossroad. Technological Factors / Filippov SP, Keiko A V.: Therm. Eng., 2021. V. 68. P. 209–220.
2. Coal – World Energy Outlook 2019 – Analysis - IEA n.d.
3. Thermo-chemical routes for hydrogen rich gas from biomass: A review / Saxena RC, Seal D, Kumar S, Goyal HB.: Renew. Sustain. Energy Rev. 2008. V. 12. P.1909–1927.
4. Keskin A., Gürü M., Altiparmak D. Influence of tall oil biodiesel with Mg and Mo based fuel additives on diesel engine performance and emission// Bioresour. Technol. 2008. V. 99. P. 6434-6438.

Исследование поддержано грантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение №075-15-2024-543

УДК 620.9

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА СЖИГАНИЯ ЖИДКОГО НЕПРОЕКТНОГО ТОПЛИВА В РАСПЫЛИТЕЛЬНОМ ГОРЕЛОЧНОМ УСТРОЙСТВЕ С РЕГУЛИРУЕМОЙ ПОДАЧЕЙ ПЕРВИЧНОГО ВОЗДУХА

Шадрин Е.Ю., Мухина М.А., Садкин И.С., Копьев Е.П.,

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

В настоящее время актуальной является задача вовлечения в топливно-энергетический баланс накопленных некондиционных топлив и горючих отходов (отработанные смазочные жидкости, отходы нефтедобычи и нефтепереработки и др.). Эти виды дешевых энергоносителей на сегодняшний день не находят масштабного применения по причине отсутствия универсальной эффективной и экологически безопасной технологии их утилизации. При правильном использовании таких источников энергии [1] они могут быть альтернативой качественным видам топлива, при одновременном решении экологической проблемы.

В ИТ СО РАН исследуется способ сжигания жидкого углеводородного топлива распыляемого нагретой струей воздуха или перегретого водяного пара [2]. В работах было показано, что использование перегретого водяного пара позволяет значительно снизить содержание вредных выбросов в продуктах сгорания, по сравнению с другими типами разбавителей.

В настоящей работе исследуется сжигание отработанного автомобильного масла на распылительном горелочном устройстве, схема которого представлена на Рис. 1.

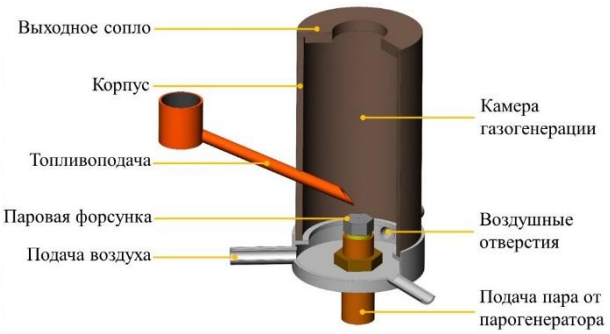


Рис 1. Схема горелочного устройства.

Исследования проведены на экспериментальном огневом стенде [3], основными элементами которого являются: распылительное горелочное устройство, регулируемая система подачи топлива и сжатого воздуха, измерительное оборудование. Была проведена серия экспериментов по измерению температуры и состава промежуточных продуктов сгорания в пламени при сжигании отработанного масла. Расход масла составлял 0.95 кг/ч, расход пара – 0.65 кг/ч, а расход первичного воздуха варьировался в диапазоне 4.5-12 кг/ч. На рисунке 2 представлены характерные фотографии пламени при различных расходах воздуха.

4.5 кг/ч 7 кг/ч 9.5 кг/ч 12 кг/ч

Рис. 2. Характерные фотографии пламени при различных расходах первичного воздуха

В ходе экспериментального исследования определены следующие показатели процесса сжигания: профили температуры пламени, количество выделяемой теплоты, состав промежуточных и конечных продуктов сгорания топлива. Показано, что варьирование расхода первичного воздуха позволяет влиять на структуру пламени и уровень выбросов. Способ распыла топлива перегретым водяным паром позволяет снизить уровень выброса вредных продуктов сгорания (таких как CO и NOx) и может быть использован для создания горелочных устройств с целью утилизации некондиционных топлив (в рамках Waste-to-Energy технологии).

Список литературы:

1. Breeze, P. Energy from Waste; Elsevier Inc., 2018; 100 p. DOI: 10.1016/C2015-0-05948-2
2. Anufriev I.S., Shadrin E.Y., Kopyev E.P., Sharypov O.V. Experimental investigation of size of fuel droplets formed by steam jet impact // Fuel. 2021. Vol. 303. Art. No.121183. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.121183
3. Anufriev I.S., Alekseenko S. V., Sharypov O. V., Kopyev E.P. Diesel fuel combustion in a direct-flow evaporative burner with superheated steam supply // Fuel. 2019. Vol. 254. P. 115723.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-79-10029)

УДК 536.7

НАХОЖДЕНИЕ УСЛОВИЙ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА ГОРЕНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА ПРИ ЕГО РАСПЫЛЕ ПЕРЕГРЕТЫМ ВОДЯНЫМ ПАРОМ ПУТЕМ АНАЛИЗА РЕЖИМНЫХ КАРТ

Тарулин М.А.[1,2], Копьев Е.П.[1]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] Новосибирский государственный технический университет,
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Необходимость в гибком управлении энергетическим оборудованием, в случае сжигания углеводородного топлива при производстве энергии приводит к повышению концентраций вредных веществ в продуктах сгорания, которое имеет множество прямых негативных последствий для окружающей среды. Одним из вариантов снижения негативного воздействия при производстве энергии является оптимизация режимов работы существующих установок в реальном времени.

Целью данной работы является нахождение условий оптимального режима горения жидких углеводородных топлив при их распыле струей перегретого водяного пара с помощью режимных карт. Оптимальным является режим, при котором горелочное устройство развивает номинальную мощность с заданными экологическими и экономическими показателями. Режимные карты показывают содержание компонента дымовых газов при различном расходе топлива и вводимого в пламя распылителя.

Построение режимных карт происходит с помощью аппроксимации экспериментальных данных радиально-базисными функциями с линейным ядром по формуле (1) [1].

$$f(x,y,z) = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i \cdot -r_i\,, \qquad (1)$$

где x, y, z – координаты текущей поверхности, $-r_i$ – линейная радиально-базисная функция, λ_i – весовой коэффициент *i-ой* опорной точки, r_i – Евклидово расстояние от текущей точки до *i-ой* опорной точки, рассчитанное по формуле (2).

$$r_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} \qquad (2)$$

Из-за особенностей аппроксимации поверхности могут содержать отрицательные значений концентрации компонентов, что с физической точки зрения неверно. Такие концентрации в ходе исследования были заменены на нулевые значения.

Для сглаживания линий уровней применена медианная фильтрация поверхности по формуле (3). Полученные поверхности будут использованы для получения уравнения оптимального режима.

$$Y = \begin{cases} X\left[\frac{N}{2}\right], & \text{если } N - \text{нечетное;} \\ \frac{X\left[\frac{N}{2}-1\right] + X\left[\frac{N}{2}\right]}{2}, & \text{если } N - \text{четное,} \end{cases} \qquad (3)$$

Уравнение оптимального режима предлагается получать как среднее между уравнениями минимальных концентраций и максимальных значений градиента монооксида углерода.

Линий максимальных значений градиента монооксида углерода на режимной карте – две. Они делят режимную карту на 3 зоны. Зону оптимального горения, где горючее и окислитель полностью используются при горении, зону богатой смеси, где существует избыток топлива и пульсационная зону с избытком окислителя [2].

Нижняя линия максимального значения градиента монооксида углерода говорит о переходе режима с оптимальной зоны в зону богатой смеси и отличается высокой эффективностью работы горелочного устройства, но в то же время эта линия характеризуется резким повышением концентрации монооксида углерода.

Для определения оптимального режима работы установки предлагается использовать среднее значение между двумя параметрами: градиентом максимального значения монооксида углерода, указывающим на максимальную эффективность установки, и минимальными концентрациями монооксида углерода, при которых негативные последствия процесса горения минимальны. Эти параметры представлены на режимной карте (см. рис. 1) и позволяют найти баланс между эффективностью и безопасностью работы установки.

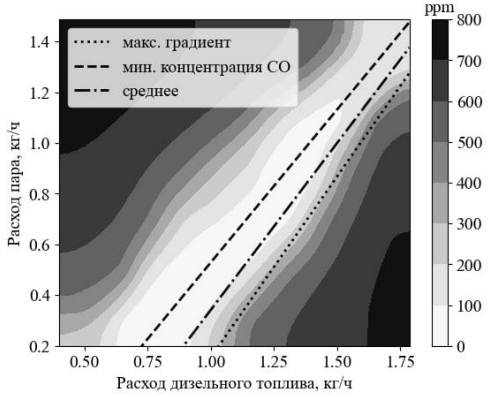


Рис. 1. Режимная карта содержания монооксида углерода в дымовых газах.

Список литературы:

1. Косников, Ю. Н. Особенности применения радиальных базисных функций в геометрическом моделировании трехмерных объектов визуализации / Ю. Н. Косников // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2020. No 4 (36). – С. 55–70. – DOI 10.21685/2227-8486-2020-4-6.

2. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ / Пер. с англ. Г.Л. Агафонова. Под ред. П.А. Власова. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. - 352 с. — ISBN 5-9221-0438-1.

УДК 621.039.5

БАЗОВЫЕ МОДЕЛИ ТЯЖЕЛОАВАРИЙНОГО МОДУЛЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО КОДА ЕВКЛИД/V2 ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ А.З. РУ С ЖМТ

Усов Э.В.[1], Чухно В.И. [1], Климонов И.А. [1], Озрин В.Д. [2], Мосунова Н.А.[2]

[1] ИБРАЭ РАН, Новосибирский филиал,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] ИБРАЭ РАН,
115191, г. Москва, Большая Тульская ул., д. 52

Растущий интерес к анализу процессов разрушения твэлов быстрых реакторов с жидкометаллическим охлаждением обусловлен необходимостью обеспечения безопасной эксплуатации таких реакторных установок. Существуют различные механизмы разрушения твэлов. Первый механизм относится к термомеханическому повреждению, которое может быть вызвано, например, превышением предельно допустимых напряжений в оболочке. Второй механизм разрушения (термический) связан с плавлением оболочки или топлива. Стоит отметить, что плавление для нитридного топлива наблюдается только при наличии над поверхностью нитрида атмосферы из азота с давлением, превышающим 10^5 Па. Если азот отсутствует над поверхностью, то нитрид диссоциирует, образуя расплав урана и плутония. Расплав урана вступает в химическое взаимодействие с оболочечной сталью, растворяя ее. Этот процесс представляет собой третий механизм разрушения. Представленная работа посвящена моделям для расчета разрушения твэлов только для второго (термического) и третьего (термохимического) механизмов, реализованным в тяжелоаварийном модуле интегрального кода ЕВКЛИД/V2.

Наиболее продвинутыми методами для моделирования термического разрушения твэлов являются подходы, основанные на решении уравнения теплопроводности с учетом фазового перехода (так называемая задача Стефана) как аналитически [1], так и численно [2]. Однако аналитические методы имеют определенные недостатки, такие как ограниченная область применимости. Обычно точное аналитическое решение возможно только при условии постоянных свойств материалов и граничных условий. В реальности свойства материалов (теплопроводность, плотность, теплоемкость) при высоких температурах, характерных для серьезных аварий, могут изменяться на значительные величины – до десятков или даже сотен процентов. По этой причине, в тяжелоаварийном модуле интегрального кода ЕВКЛИД/V2 [3] для описания процесса плавления и определения температурного поля уравнение теплопроводности решается численно с использованием метода контрольных объемов. Для моделирования перемещения и повторного затвердевания расплава оболочки или топлива численно решаются уравнения сохранения массы, энергии и импульса. Один из примеров расчета распределения материалов и температуры твэла приведен на рис.1. Решение уравнения теплопроводности совместно с уравнением сохранения энергии для расплава позволяет рассчитать температурное поле в твэле, которое определяет скорость химического взаимодействия оболочки твэла и расплава урана, образующегося в процессе диссоциации СНУП топлива. Расплав урана способен разрушить оболочку твэла еще до начала ее плавления из-за эвтектического взаимодействия. Эвтектическое взаимодействие нержавеющей стали и урана изучалось в отдельных экспериментах [4]. На основании экспериментов было показано, что в процессе химического взаимодействия образуются соединения UFe_2 и UFe_6, а скорость растворения оболочки может достигать 0,4 мм/с.

Для моделирования процессов химического взаимодействия в тяжелоаварийном модуле реализованы специальные модели, основанные на решении уравнения диффузии компонентов стали в расплаве жидкого урана.

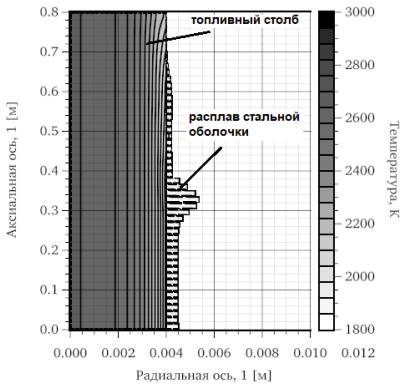


Рис. 1. Распределение температуры и материалов в твэле

Исследование выполнено в рамках Государственного контракта №Н.4о.241.19.24.1034 от 04.04.2024 на выполнение научно-исследовательской работы «Разработка интегрированных систем кодов нового поколения для разработки и обоснования безопасности ядерных реакторов, проектирования атомных электростанций, создания технологий и объектов ядерного топливного цикла. Этап 2024-2025 годов» (государственный заказчик – Госкорпорация «Росатом»).

Список литературы:

1. Epstein M., Hauser G.M. The melting of finite steel slabs in flowing nuclear reactor fuel. Nucl. Engnr. Des. 1979. v. 52. pp. 411 – 428.
2. M. Ishii, W.L. Chen, M.A. Grolmes. Molten Clad Motion Model for Fast Reactor Loss-of-Flow Accidents. Nuclear Science and Engineering. 1976. v. 60. i.4. pp. 435 – 451.
3. Бутов А. А., Жданов В. С., Климонов И. А. и др. Физические модели для расчета разрушений твэла и активной зоны реактора с жидкометаллическим теплоносителем, реализованные в коде ЕВКЛИД/V2. Теплоэнергетика. 2019. № 5. с.5-15.
4. Walter C.M., Kelman L.R. The interaction of iron with molten uranium. Journal of Nucl. Mat. 1966. v. 20. pp. 314 – 322.

УДК 536.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ТРУБОПРОВОДНОЙ ИЗОЛЯЦИИ В КАМЕРЕ С ВРАЩАЮЩЕЙСЯ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ТРУБОЙ

Хуснутдинова М.А., Хайбуллина А.И., Синявин А.А., Хайруллин А.Р.

Казанский Государственный Энергетический Университет «КГЭУ»,
420066, Россия, Казань, ул. Красносельская, 51

Энергосбережение при транспортировке тепловой энергии является одной из важнейших проблем. По опыту проведения энергетических обследований величина тепловых потерь при транспортировке теплоносителя в существующих тепловых сетях составляет 15 – 30 % в зависимости от времени года. В связи с этим существенно возрастает роль теплоизоляционных конструкций трубопроводов тепловых сетей как фактора, способствующего экономии топлива, а также поддерживающего необходимый температурный режим в изолируемых системах [1].

В настоящее время методика определения теплофизических свойств изоляции трубопроводов в стационарных условиях регулируется ГОСТ 32025 [2]. Для измерения теплопроводности теплоизоляционных материалов необходимо создать равномерный радиальный тепловой поток через материал и измерить разницу температур между внешней стороной изоляции и нагревателем (в установившемся режиме). Одним из подходов технической реализации данной методики является использование теплоизолированной камеры и установленной в центре неподвижной нагревательной трубы [3]. Однако у такого подхода есть существенный недостаток – ввиду сложного сопряженного теплообмена и неоднородного конвективного потока температура поверхности изоляции распределяется неравномерно. Для решения этой проблемы предложен подход включающий вращение обернутой образцом испытуемого изоляционного материала нагревательной трубы вокруг своей оси [4].

В работе численно исследуется теплообмен в изоляции на вращающейся нагревательной трубе в условиях замкнутого кольцевого пространства испытательной камеры. Теплообмен в изоляции моделируется дифференциальным уравнением Фурье-Кирхгофа в двухмерной постановке с граничными условиями первого рода на внутренней поверхности изоляции. Внешнее неоднородное температурное поле в кольцевом зазоре камеры задается на внешней поверхности изоляции в виде граничных условий третьего рода. При этом профили коэффициентов теплоотдачи по окружности изоляции (см. рис. 1) получены ранее в результате моделирования конвективного теплообмена в кольцевом зазоре камеры [4].

В результате установлено, что придание вращения приводит к существенному выравниванию температурного поля внутри изоляции. На рисунке 1 приведены распределения температур по поверхности изоляции толщиной 100 мм. По сравнению с неподвижной изоляцией, вариация разности температур на вращающейся изоляции (5 об/мин) снизилась с 4,27% до 0,15%. При этом, неоднородность профиля коэффициента теплоотдачи практически не изменилась (снижение вариации с 58% до 46%).

Таким образом, подход с вращением нагревательной трубы имеет хороший потенциал для повышения точности измерения теплопроводности трубопроводной изоляции с помощью замкнутых камер.

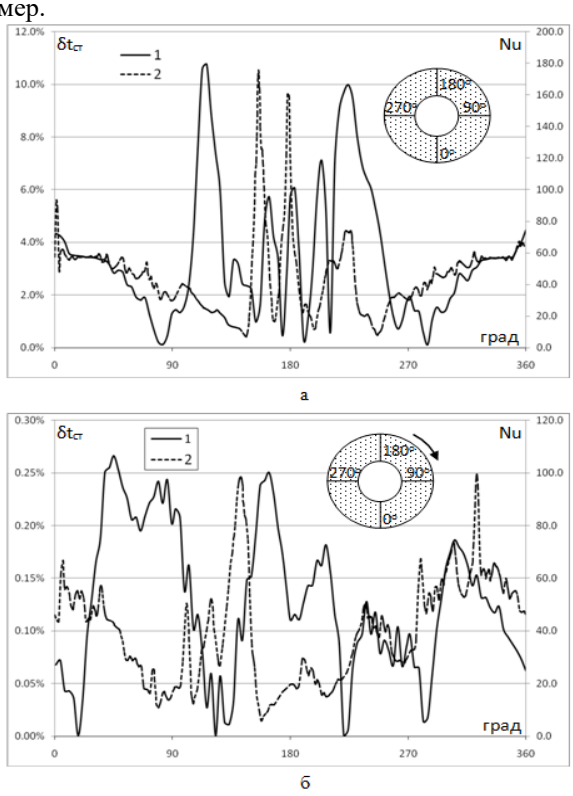


Рис. 1. Распределение тепловых характеристик по поверхности изоляции (а – без вращения изоляции; б – частота вращения изоляции 5 об/мин): 1 – относительное отклонение разности температур от среднего значения по окружности (δt_{cm}); 2 –теплоотдача на внешней поверхности изоляции (Nu) .

Список литературы:

1. Кузнецов Г.В., Половников В.Ю. Анализ тепловых потерь теплотрубопроводов в условиях взаимодействия с влажным воздухом // Энергосбережение и водоподготовка. 2009. №2. С. 37–39.
2. ГОСТ 32025-2012. Тепловая изоляция. Метод определения характеристик теплопереноса в цилиндрах заводского изготовления при стационарном тепловом режиме.
3. Porzuczek J. Comparative Study on Selected Insulating Materials for Industrial Piping. Materials (Basel). 2024 Mar 31;17(7):1601. doi: 10.3390/ma17071601. PMID: 38612114; PMCID: PMC11012858.
4. Власова М.А. Разработка устройства и способа определения теплопроводности материалов: дис. … магистра теплоэнергетики и теплотехники: номер специальности 13.04.01 / Казанский государственный энергетический университет; Власова М.А.. – Казань, 2023. – 75 с.

«Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00461» rscf.ru/project/24-29-00461/

УДК 536.244

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В НАСАДКАХ РЕКУПЕРАТИВНЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

Шабалов С.Д.[1], Горбачев М.В.[1]

[1] Новосибирский государственный технический университет,
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Регенераторы – теплообменные аппараты, которые широко используются в вентиляционных системах с целью регенерации вытяжного воздуха [1-5]. Данное решение позволяет снижать тепловые потери в зданиях [6]. В данной работе проводится численное моделирование теплогидравлических процессов, протекающих в каналах теплообменников-регенераторов. На рисунке 1 представлена геометрическая и расчетная модели регенератора.

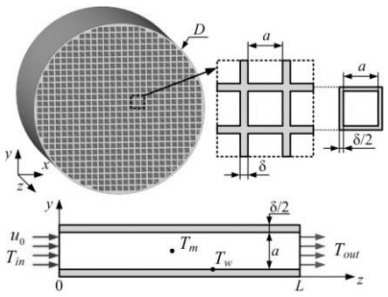


Рис.1 – Геометрическая модель

Регенеративная канальная насадка (рис. 1) из одного блока с наружным диаметром D=93мм. Канал длиной L=99мм квадратного поперечного сечения со стороной a=2,4мм имеет толщину стенки δ=1,0мм.

Допущения, принятые при разработке математической модели:

– режим течения воздуха в канале ламинарный;

– фазовые переходы (конденсация, испарение) не учитываются;

– воздух представляет собой идеальный газ, теплофизические свойства воздуха постоянные (кроме плотности);

– материал теплообменной секции изотропный;

– стенки одиночного канала адиабатные;

– теплообмен излучением не учитывается;

Условия однозначности, применяемые при моделировании теплогидравлических процессов:

– начальные условия (при $\tau = 0$, $0 \le z \le L$):

$$T(x, y, z, 0) = T_0, \quad u = v = z = 0;$$

– граничные условия:

$$T(0, y, z, \tau) = T_{in}, \; u(0, y, z, \tau) = u_0, \; P(0, y, z, \tau) = 0.$$

Полученная система дифференциальных уравнений совместно с граничными условиями решалась численно с использованием метода SIMPLE в программном комплексе Ansys Fluent. Моделирование тепловых процессов проводилось в нестационарной постановке до достижения температуры потока постоянного значения, т.е. до достижения квазистационарного состояния.

Результатами численного моделирования являлись основные параметры системы, такие как среднемассовые температуры потока (T_f) и среднемассовая температура поверхности стенки канала (T_w).

На рисунке 2 показано изменение температур стенок канала и температур потока для различных материалов. В качестве исходных данных задавалось: T_{in}=293К, u_0=0,7м/с – в режиме нагрева и T_{in}=273К, u_0=0,7м/с – в режиме охлаждения. Как видно из приведенных графических зависимостей, выход на квазистационарное состояние для различных материалов наблюдается по истечению следующих отрезков времени: 1100 с для стенок из алюминия, 400 с для стенок из керамики, 500 с для стенок из полипропилена.

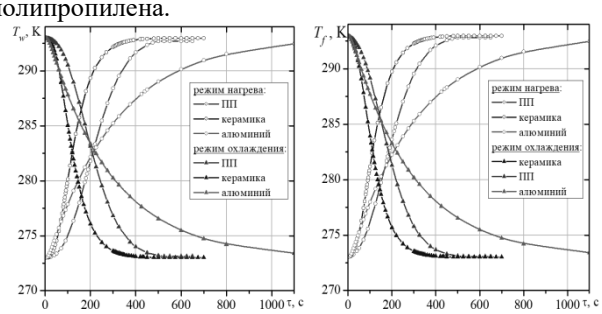


Рис.2 –Изменение температур

Разработанная математическая модель может быть использована при исследовании влияния исходных данных (температура, скорость потока воздуха на входе), а так же при вариациях применяемых материалов стенки на локальные и интегральные характеристики потока, а также для моделирования работы регенераторов периодического действия.

Список литературы:

1. Aktershev S.P., Mezentsev I.V., Mezentseva N.N. Parametric study of a regenerative heat exchanger for ventilation with a periodic change in the air flow direction. – Applied Thermal Engineering. 2022. Т. 202. С. 8.

2. Низовцев М.И., Бородулин В.Ю., Летушко В.Н. Регенеративный теплообменник для вентиляции помещений с периодическим изменением направления воздушного потока. – Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22. № 6. С. 785-796.

3. Aktershev S.P., Mezentsev I.V., Mezentseva N.N. Numerical Simulation of the Counterflow Regenerative Rotary Heat Exchanger. – Journal of Physics: Conference Series. 36. Сер. "XXXVI Siberian Thermophysical Seminar, STS 2020". – 2020. – С. 20.

4. Penev A., Tsokov L. Application of polymer thermal store material in fixed honeycomb regenerative heat exchanger. – E3S Web of Conferences. 25. Сер. "25th Scientific Conference on Power Engineering and Power Machines, PEPM 2020".– 2020.– С. 8.

5. Borodulin V.Yu., Nizovtsev M.I. A criterial analysis of the effectiveness of air-to-air heat exchangers with periodic change of airflow direction. – Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk.– 2018.– С. 1246-1255.

6. Penev A., Tsokov L., Penkova N. A conjugate heat transfer in a fixedbed ceramic regenerator for air conditioning applications – Journal of Chemical Technology and Metallurgy.– Sofia. Vol 55(5).– С.1132-1139.

Секция 10 Тепломассоперенос в технологических процессах, решение экологических проблем, низкоуглеродная энергетика

УДК 621.311.22

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗИФИКАЦИИ БИОМАССЫ В ПОТОЧНОМ РЕЖИМЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ПИЛОТНОЙ УСТАНОВКЕ

Никитин А.Д.[1], Абаимов Н.А.[1], Ершов М.И.[1], Симбирятин Л.В.[2], Рыжков А.Ф.[1]

[1] Уральский федеральный университет,
ул. Мира 19, Екатеринбург, 620002, Россия
[2] ООО "Промышленный Перлит",
ул. Владимира Высоцкого 4б, Екатеринбург, 620072, Россия

Поточные газификаторы на ископаемом топливе обладают наибольшими показателями производительности и эффективности по сравнению с другими (слоевыми) технологиями. Одним из основным ограничений поточных газификаторов являются жёсткие требования к топливу и топливоподготовке. Биомасса представляет из себя относительно новое топливо для поточных технологий. Крупные источники биомассы являются исключением из правил, установки на биомассе имеют, как правило, малую мощность и применяются в распределённой энергетике.

Работа направлена на создание научных основ и технологии высокопроизводительного процесса получения биосинтез-газа с целью снижения углеродного следа и повышения его эксплуатационных характеристик для энергетики.

Для достижения поставленной цели разработана лабораторная установка газификации биомассы в поточном режиме с расчётной производительность по топливу 8–20 кг/ч.

Реакционное пространство газификатора имеет высоту 1,5, а диаметр широкой части составляет 0,3 м. Предусмотрено три варианта подачи воздуха и варианта подачи топлива, что позволяет исследовать различные варианты подачи топлива и воздуха в реактор. В данной работе исследован вариант, включающий подачу первичного воздуха снизу (по оси реактора), подачу вторичного воздуха в нижний цилиндрический участок через четыре сопла, расположенных перпендикулярно вертикальной оси реактора.

Воздух подается с помощью воздуходувки. Расход воздуха регулируется вентилем и измеряется ротаметром. Воздух подогревается электрическим нагревателем из нихромовой спирали до температуры 400°C. Топливо (сосновые опилки) подается шнеком с регулируемой частотой вращения из бункера.

Средний размер опила составил 90–2000 мкм, что является довольно широким диапазоном, который не используется в классических пылеугольных установках. Соответственно, традиционно применяемые технологии газификации для данного топлива неприменимы, либо требуют серьёзной конструкционной и режимной адаптации.

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

После камеры дожигания осуществляется присос воздуха для снижения температуры продуктов сгорания до температуры 150-170°C. Охлажденные дымовые газы направляются дымососом в дымовую трубу.

Проведено CFD-моделирование полученных результатов с использованием программного комплекса OpenFOAM. Для отражения всех возможных режимов работы установки разрабатываются две новые CFD-модели. Поточный режим газификации рассчитывается с помощью модифицированного решателя coalChemistryFoam, в который были добавлены реакции газификации. Проведённая валидация разрабатываемой CFD-модели с использованием литературных экспериментальных данных свидетельствует об удовлетворительной применимости модели для расчёта и анализа процесса поточной газификации биомассы в установках со сложной гидродинамической структурой.

Максимальная температура в установке 1100°C наблюдается на высоте 0,2 м, что соответствует точке первого контакта топлива с воздухом. Состав синтез-газа колеблется в широких пределах в зависимости от коэффициента расхода воздуха H_2=5–9%, CO=11–21%, CH_4=1–7%, теплота сгорания сухого синтез-газа 2,5–5,8 МДж/м^3. Из литературного анализа видно, что теплота сгорания в разрабатываемой установке соответствует мировому уровню. Установка газификации биомассы циклонного принципа действия, представленная в [1], позволяет получать синтез-газ с теплотой сгорания до 4,5 МДж/м^3. Теплоты сгорания полученного синтез-газа достаточно для работы газовых турбин и ДВС. В настоящей работе синтез-газ сжигался в ДВС с выработкой электроэнергии, которая подавалась на блок ламп накаливания. В данный момент проводятся исследования с целью уменьшения образования агломераций, концентрации смол и сажи в синтез-газе.

Список литературы:

1. Gabraa M., Petterssona E., Backmanb R., Kjellstrom B. Evaluation of cyclone gasifier performance for gasification of sugar cane residue—Part 1: gasification of bagasse // Biomass and Bioenergy. 2001. V. 21. P. 351–369.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы развития Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина в соответствии с программой стратегического академического лидерства "Приоритет-2030".

УДК 536.24

УПРАВЛЕНИЕ ФОРМАМИ ФРОНТОВ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И ПОЛЯМИ ТЕМПЕРАТУРЫ В КРИСТАЛЛАХ В МЕТОДЕ ЧОХРАЛЬСКОГО

Бердников В.С.[1,2], Винокуров В.В.[1], Винокуров В.А.[1], Кислицын С.А.[1], Митин К.А.[1]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] Новосибирский государственный технический университет,
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Работа является продолжением [1-5] и направлена на дальнейшее изучение сценариев развития конвективного течения в условиях подавляющего или значительного влияния сил плавучести и термокапиллярного эффекта и устойчивости пограничных слоев, развивающихся на фронтах кристаллизации. Метод Чохральского - основной и наиболее производительный технологический процесс вытягивания кристаллов из расплавов. В этом процессе кристаллы вытягиваются со свободной поверхности расплава. Во всех его вариантах между фронтом кристаллизации (ФК) и нагретыми боковыми стенками тигля всегда есть радиальный градиент температуры и существенно влияние сил плавучести термокапиллярного эффекта на течение расплава. Перепаду температуры между ФК и стенками тигля соответствуют числа: Грасгофа Gr и Марангони Ma. В режимах тепловой гравитационно-капиллярной конвекции кристалл растет с выпуклым в расплав ФК [1 - 5]. Для управления радиальными распределениями локальных тепловых потоков и формой ФК используется подбор скоростей вращения кристалла и тигля. Процесс многопараметрический и теплообмен в ростовом узле имеет сложный сопряжённый характер. Ключевой проблемой является оптимальное управление конвективным теплообменом на всех стадиях роста кристалла. Одна из плохо исследованных проблем – влияние монотонного снижения уровня расплава в тигле при вытягивании кристалла на гидродинамику и конвективный теплообмен. Одновременно увеличивается длина кристалла и меняются условия радиационно-конвективной теплоотдачи с его поверхности. Эти процессы также слабо исследованы в режимах сопряженного теплообмена.

При снижении высоты слоя расплава меняется относительная роль сил плавучести и центробежных, меняется пространственная форма, интенсивность течения, локальный теплообмен на ФК и его форма. Численно методом конечных разностей в зависимости от относительной высоты слоя расплава в диапазоне $0.1 \le H/R_T \le 2.0$ исследована эволюция пространственной формы течения расплава гептадекана с числом Прандтля Pr = 40 при отношении радиусов тигля и кристалла $R_T/R_K = 1{,}94$, при фиксированной скорости вращения кристалла, соответствующей значению числа Рейнольдса $Re_K = 95$, при значениях Gr = 1214, Ma = 2932. При фиксированном значении H/R_T изучено влияние Re_K и Re_T на пространственные формы течения и на радиальные распределения локальных тепловых потоков. Результаты сопоставлены с данными экспериментов, полученными в диапазоне $0.35 \le H/R_T \le 1.75$ при числах Gr, Ma и Re_K, от соответствующих подавляющему влиянию сил плавучести и термокапиллярного эффекта до практически режимов вынужденной конвекции.

Численно методом конечных элементов исследовано влияние перепадов температуры (Gr, Ma) и скорости вращения кристалла (Re_K) на процессы кристаллизации, на формы ФК при Pr = 0,05, 10, 40-45. Исследовано влияние амплитудно-частотных характеристик пульсаций температуры на мгновенные формы ФК при Pr = 10, соответствующем воде – жидкости имитаторе расплавов с учетом инверсной зависимости плотности от температуры и теплоты фазового перехода.

Сочетая физическое и численное моделирование, найдены режимы с равномерным распределением локального теплового потока на фронте кристаллизации, соответствующие плоским формам ФК. Результаты исследований гидродинамики, полученные в режимах однофазной конвекции и при кристаллизации практически адекватны реальным технологическим условиям получения монокристаллов для микроэлектроники, лазерной и другой техники.

Численно методом конечных элементов в сопряжённой постановке исследовано влияние на поля температуры в кристаллах кондуктивного, радиационно-кондуктивного, конвективного и радиационно-конвективного режимов теплообмена при Pr = 0,68 (аргон), в диапазоне чисел Грасгофа от 1000 до 16000, при отношениях длин монокристалла к радиусу от 1 до 8. Изучена теплоотдача от неподвижных и равномерно вращающихся кристаллов в диапазоне скорости вращения от 0 до 25 оборотов в минуту.

Список литературы:

1. Бердников В.С., Винокуров В.А., Винокуров В.В. Влияние нестационарных режимов свободной и смешанной конвекции расплавов на теплообмен и формы фронтов кристаллизации в методе Чохральского // Известия Российской академии наук. Серия Физическая. 2017. Т. 81, № 10. С. 1395–1402.
2. Berdnikov V S and Vinokurov V V. The influence of crucible and crystal rotation on the hydrodynamics of a melt with a Prandtl number 16 and on heat transfer in the Czochralski method // Journal of Physics: Conference Series 1677 (2020) 012182
3. Бердников В.С., Митин К.А., Григорьева А.М., Клещенок М.С. Зависимость полей температуры в кристаллах от их теплофизических параметров и свойств окружающей среды в методе Чохральского при различных режимах теплообмена // Известия РАН. Серия Физическая. – 2017. – № 9. – С. 1198 – 1204.
4. Mitin K.A., Berdnikov V.S. Effect of uniform crystal rotation on convective and radiation-convective heat transfer in the Czochralski method // Journal of Physics: Conference series – 2019, V. 1382 012198. doi:10.1088/1742-6596/1382/1/012198
5. Kislitsyn S. A., Berdnikov V. S. Numerical studies of the effect of the temperature drop in the crucible - melt - cooled disk system on the shapes of crystallization fronts // Journal of Physics: Conference Series 2119 (2021) 012084

УДК 662.739

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ПЛОЩАДИ ПОВЕРХНОСТИ УГЛЕРОДА, ПОЛУЧЕННОГО ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ КОНВЕРСИИ СМЕСИ ТОРФА С ДРЕВЕСНЫМИ ОПИЛКАМИ

Берикболов А.К.[1], Янковская Н.С.[1], Мисюкова А.Д.[1, 2], Янковский С.А.[1,2]

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

[2] Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
650000, Россия, Кемерово, ул. Весенняя, 28

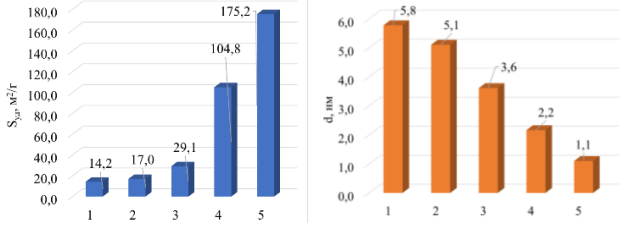
В последние десятилетия наблюдается значительное увеличение научной активности в области исследования и разработки углеродных материалов. Это проявляется в систематическом создании различных аллотропных форм углерода, таких как карбины, фуллерены, нанотрубки, циркулены, а также в разработке широкого ассортимента пористых материалов, включая смешанные (переходные) формы углерода, которые имеют практическое применение в качестве адсорбентов, катализаторов и носителей для катализаторов. Новые подходы также разрабатываются для изучения химического состояния и реакционной активности углеродных поверхностей [1].

Активный углерод может быть получен путем пиролиза (карбонизации) углеродсодержащих материалов, таких как древесина, торф, каменный уголь, лигнин, смолы, нефтяные остатки, фруктовые косточки, скорлупа орехов и т.д, при температурах от 500 до 1000 ˚С. Одним из возможных новых решений получения углерода может стать смесь торфа в сочетании с древесными отходами [1]. Торф, обладающий высокой пористостью и содержанием органических веществ, рассматривается как ценное сырье, в то время как древесные отходы служат углерод-нейтральной добавкой, способствующей горению при более низких температурах [2].

В качестве исходного материала был использован торф Суховинского месторождения Томской области, добытый с глубины 0,5-1 м. В качестве добавки к торфу использовались отходы лесопиления из села Дзержинское, Томская область. Перед началом эксперимента оба компонента были измельчены с помощью лабораторного измельчителя Stegler-1000 и просеяны через лабораторное сито РЛ-1. Частицы торфа просевали через сито с размером ячеек 80 мкм, а частицы древесины - через сито с размером ячеек 200 мкм. Затем оба компонента были смешаны в различных массовых пропорциях в течение 5 минут. Масса смеси, помещаемой в тигель, составляла 8 грамм, и нагревалась до температуры 600 ˚С. Во время эксперимента продолжалась непрерывная подача инертного газа с целью исключения окисления пиролизируемых компонент.

Текстурные характеристики образца были определены с использованием анализатора Sync 420A (3P Instruments, Germany). Подготовка образца включала предварительное удаление внешней влаги на дегазаторе в течение 10 часов при 105°С в вакууме. Удельная площадь поверхности образца была рассчитана методом Брунауэра-Эммета-Теллера, а объем пор и распределение пор определялись методом Баррета-Джойнера-Халенды.

На рисунке 1 приведены типичные результаты удельной площади поверхности углеродов, полученные при различном концентрационном соотношении торфа и древесных опилок: 1) Т-100 %; 2) Т-90 %/Д-10 %; 3) Т- 75 %/Д-25 %; 4) Т-50 %/Д-50%; 5) Д-100 %.



а) б)

Рис. 1. Типичные результаты: а) удельная площадь поверхности углеродов; б) средняя пористость углеродов

Как показано на рисунке 1, добавление доли древесины к торфу и последующее получение углеродных материалов на их основе привело к увеличению удельной площади поверхности. Удельная площадь поверхности при концентрации ТО_50 % / ДО_50 % составила 104,849 м^2/г и продемонстрировала наивысший результат среди всех образцов.

В соответствии с результатами анализа, полученный углерод при различных концентрационных соотношениях торфа и древесных опилок обладает мезопористой структурой. Размер пор в основном составляет от 2 до 6 нм (см. рис. 1, б).

Углерод имеет широкий спектр применений в области очистки воды, включая питьевую и сточную воду, а также водные растворы, такие как спиртные напитки и сахарные сиропы. Они функционируют как адсорбенты, способные поглощать пары из газовых выбросов, например, для удаления диоксида серы из воздуха, а также для улавливания паров летучих растворителей с последующим их восстановлением, а в случае активированных углей их применение еще шире, например, в противогазах, в хроматографии и в вакуумной технике, где они служат для создания сорбционных насосов [1].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № FZES-2024-0001.

[1] H. Tolvanen, L. Kokko, and R. Raiko, “Fast pyrolysis of coal, peat, and torrefied wood: Mass loss study with a drop-tube re-actor, particle geometry analysis, and kinetics modeling,” Fuel, vol. 111, pp. 148–156, Sep. 2013.

[2] Y. Li, H. Zhao, X. Sui, X. Wang, and H. Ji, “Studies on indi-vidual pyrolysis and co-pyrolysis of peat–biomass blends: Thermal decomposition behavior, possible synergism, product characteristic evaluations and kinetics,” Fuel, vol. 310, p. 122280, Feb. 2022.

УДК 661.666.4

КАРБОНИЗАЦИЯ БИОМАССЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОРИСТЫХ РАДИАЦИОННЫХ ГОРЕЛОК

Горшков А.С.[1], Ларионов К.Б.[1], Яковлев И.А.[2], Мазной А.С.[2]

[1] Томский политехнический университет,
634050, Россия, Томск, проспект Ленина, 30
[2] Томский научный центр СО РАН,
634055, Россия, Томск, проспект Академический, 10/4

На сегодняшний день наиболее распространенной технологией промышленного производства углерода с высокой удельной поверхностью и пористостью является медленный пиролиз биомассы (до 10 °С/мин) с последующей активацией CO_2 или перегретым водяным паром при температурах 700–900 °С в течение нескольких часов [1]. Данный класс технологических решений имеет очевидные недостатки, связанные с высокими затратами энергии и длительностью процесса. Стратегия улучшения процесса оказывается весьма очевидной: быстро нагреть сырье до высоких температур, вскрыть поровую структуру биомассы за счет быстрого выхода летучих соединений и создать в её объеме мезо- и макропоры, трещины, куда подаются газифицирующие агенты для формирования микропористой структуры [2]. Несмотря на кажущуюся простоту подхода на практике реализовать быстрый и эффективный нагрев биомассы оказывается нетривиальной задачей. Для сырья растительного происхождения характерна малая теплопроводность (в среднем 0,15 Вт/м·К) из-за исходно пористой структуры, что осложняет подведение и распределения тепла по объему материала [3].

В этой связи было предложено большое количество способов интенсификации процессов теплообмена для задач тепловой обработки биомассы в целом. Среди таких способов – жаровые трубы, где частицы биомассы обрабатываются, свободно падая внутри вертикальной трубы с электронагревом. Также известны реакторы с сеточными электрическими нагревателями в зазоре между которыми располагается слой пиролизируемого материала [4].

В рамках данной работы рассматривается возможность применения радиационной горелки для реализации процесса карбонизации биомассы. Горелка изготовлена из интерметаллидных пористых сплавов и работает в режиме внутренней стабилизации пламени. Внешний вид лабораторной установки представлен ниже (см. рис. 1). Ввод материала осуществляется снизу с одновременной подачей небольшого количества азота, для предотвращения возгорания частицы при извлечении её из реакционной зоны.

Рисунок 1 – Лабораторный реактор карбонизации биомассы

В качестве образца биомассы была использована скорлупа кедрового ореха. В процессе выполнения экспериментов варьировались коэффициент избытка воздуха, продолжительность процесса (время), температура внешней поверхности нагревателя. В качестве ключевых физических параметров были определены текстурные характеристики: площадь удельной поверхности, размер и объем пор. Также оценивалось изменение внешней макроструктуры по результатам растровой электронной микроскопии.

Установлено, что при обработке частицы скорлупы кедровых орехов в пламени горелки наблюдается коллапсирование субмикронных макропор и уменьшение площади удельной поверхности. При комбинированном воздействии излучения и конвективного теплообмена наблюдается улучшение текстурных характеристик (рис. 2). Времени обработки порядка единиц секунд достаточно для получения углеродного материала с удельной поверхностью 470 $м^2/г$.

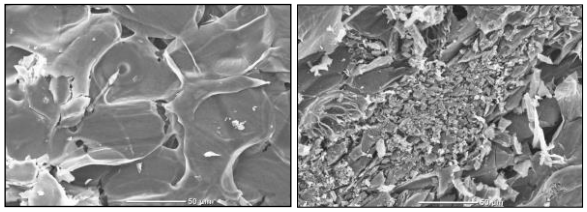


Рисунок 2 – Снимки СЭМ образца углерода при пламенном горении (слева) и комбинированной обработке (справа)

Список литературы:

1. Sajjadi B., Chen W.-Y., Egiebor N.O. A comprehensive review on physical activation of biochar for energy and environmental applications // Reviews in Chemical Engineering. 2018. V. 15. P. 735-776.
2. Guizani C., Jeguirim M., Valin S., Limousy L., Salvador S. Biomass Chars: The Effects of Pyrolysis Conditions on Their Morphology, Structure, Chemical Properties and Reactivity // Energies. 2017. V. 10. 796.
3. Mohammed Asheruddin N., Shivapuji A.M., Srinivasaiah D. Influence of gas and solid phase thermo-physical and transport properties on the thermo-chemical conversion of char in reacting media: intra-particle, microscopic and temporal mass lossbased sensitivity analysis // Combustion Theory and Modelling. 2021. V. 25. P. 589-630.
4. Trubetskaya A., Jensen P.A., Jensen A.D., Garcia Llamas A.D., Umeki K., Glarborg P. Effect of fast pyrolysis conditions on biomass solid residues at high temperatures // Fuel Processing Technology. 2016. V. 143. P. 118-129.

Работа выполнена при поддержке гранта FSWW-2022-0018, реализуемого в рамках проекта создания новых молодежных лабораторий

УДК 66.097.3:662

УГЛЕКИСЛОТНАЯ КОНВЕРСИЯ МЕТАНА В МИКРОКАНАЛЬНОМ РЕАКТОРЕ

Димов С.В., Гасенко О.А.

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

Увеличение количества углекислого газа (CO_2) в результате чрезмерного сжигания ископаемого топлива считается важным фактором, способствующим изменению климата в мире. Между тем, в связи с широкой разработкой ресурсов природного газа, эффективное использование метана (CH_4) стало серьезной проблемой. В качестве идеального способа одновременного решения этих двух проблем углекислотный (сухой) риформинг метана позволяет преобразовывать как CO_2, так и CH_4 в ценное топливо и химикаты [1]. Качественные (без спекания и отложения углерода в ходе реакции) и экономичные катализаторы являются залогом практического применения углекислотного риформинга для производства синтез газа [1,2].

В данной работе проведено экспериментальное исследование сухой (углекислотной) конверсии метана в кольцевом микроканальном реакторе с нанесенным на внутреннюю стенку канала родиевым катализатором [3].

Каталитическое покрытие, формируемое на металлическом стержне, представляет собой 2 слоя катализаторов, наносимые последовательно: 5%Rh/20%(CeO 0,4 ZrO 0,4 LaO 0,2) /Al_2O_3 и 5%Rh /(CeO 0,4 ZrO 0,4 LaO 0,2) /Al_2O_3, которые были получены с использованием метода Печини (метод сложноэфирных полимерных предшественников с применением промежуточного продукта поликонденсации этиленгликоля и лимонной кислоты и азотнокислых солей металлов-модификаторов). Системы на основе диоксидов церия и циркония, промотированные катионами лантана, обладают высокой подвижностью поверхностного и решеточного кислорода, что позволяет использовать их в процессе углекислотной конверсии метана. Нанесение промежуточного слоя TiO_2 и катализатора на металлический стержень осуществлялось последовательно аэрозольным способом, описанным в [4]. Расходы входной газовой смеси устанавливался контроллерами расхода Bronkhorst. Температура в рабочем участке создавалась внешним электрическим нагревателем., ее величина контролировалась ПИД регулятором. В опытах измерялись выходные расходы газа пенным расходомером и газовым счетчиком. Состав газовых продуктов реакций определялся с использованием хроматографов Маэстро, Кристалл. При проводимых условиях наблюдались только следы паров воды.

В процессе экспериментов было исследовано влияние температуры, расхода метана и углекислого газа на степень их конверсии. В опытах к одинаковому объемному количеству метана и углекислого газа добавлялся азот для контроля расхода. На Рис.1 приведены полученные в процессе конверсии концентрации продуктов реакции при времени контакта 115 мкс от температуры. Входные концентрации метана и углекислого газа были одинаковыми. Добавление азота позволяло контролировать выходной расход продуктов реакции. Количество водяного пара определялось из баланса входных и выходных масс водорода и кислорода, поскольку его было небольшое количество. Линии соответствуют равновесным концентрациям, рассчитанными по [5].

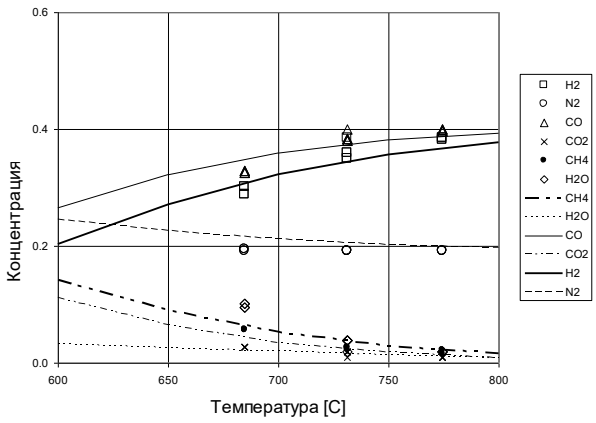


Рис.1 *Концентрации выходных газов от температуры при угекислотной конверсии метана при времени контакта 115 мс с соотношением входных газов $N_2/CO_2/CH_4 \approx 1/1/1$. Линии соответствуют равновесным концентрациям.*

В проведенных опытах при расходах соответствующих временам контакта 57, 115 мс получена высокая конверсия метана и углекислого газа.

Список литературы:

1. Li M., Sun Z., Hu Y. H. Catalysts for CO_2 reforming of CH_4: A review// Journal of Materials Chemistry A. 2021. V. 9. P. 12495-12520.
2. Arapova M , Smal E , Bespalko Y et cet Methane Dry Reforming Catalysts Based on Pr-Doped Ceria–Zirconia Synthesized in Supercritical Propanol// Energies. 2023. V. 16,. 4729
3. Kuznetsov V.V., Vitovsky O.V., Gasenko O.A. Methane Steam Reforming in an Annular Microchannel with Rh/Al_2O_3 Catalyst// J. Eng. Therm. 2009. V/18. P. 187 – 196.
4. Катализатор паровой конверсии углеводородов, способ его приготовления и способ паровой конверсии углеводородов с использованием указанного катализатора, Патент RU 254619
5. Morley C. Gaseq chemical equilibrium program. See http://www.gaseq.co.uk.

Исследование выполнено в рамках государственногозадания ИТ СО РАН (ЕГИСУ НИОКР - 121031800215-4).

УДК 533.6.071.4

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ НЕСКОЛЬКИХ ПРИПОДНЯТЫХ СТРУЙ В ПОПЕРЕЧНОМ ПОТОКЕ

Добросельский К.Г.

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

Вдув струи по нормали к поперечному потоку широко используется на практике для интенсификации тепло– и массообмена в различных технических устройствах. Поперечные струи используются во многих технологических процессах: загрязняющие вещества, выбрасываемые из дымоходов, и сточные воды; пленочное охлаждение для турбин и камер сгорания; впрыск топлива для горелок и многое другое. Устройства многократного впрыска струйного газового топлива часто встречаются в промышленности, в газовых турбинах электростанций, где смешивание топлива и воздуха имеет решающее значение для получения быстрого и стабильного изотермического или неизотермического перемешивания.

В настоящей работе представлено экспериментальное сравнительное исследование динамики вертикальных приподнятых одиночной, двух и четырех низкоскоростных изотермических осесимметричных струй, вдуваемых нормально в сносящий воздушный поток, имеющих относительную скорость $r \approx 2{,}4$–$2{,}5$.

С использованием термоанемометрического метода измерения скорости рассмотрено взаимодействие двух и четырех поперечных изотермических струй между собой и сносящим потоком, проведено сравнение с одиночной струей. На рис. 1 представлены схемы экспериментов. Струи истекают из трубок с внутренним диаметром $d = 22$ мм (внешний диаметр 28 мм) под прямым углом к направлению движения воздушного потока.

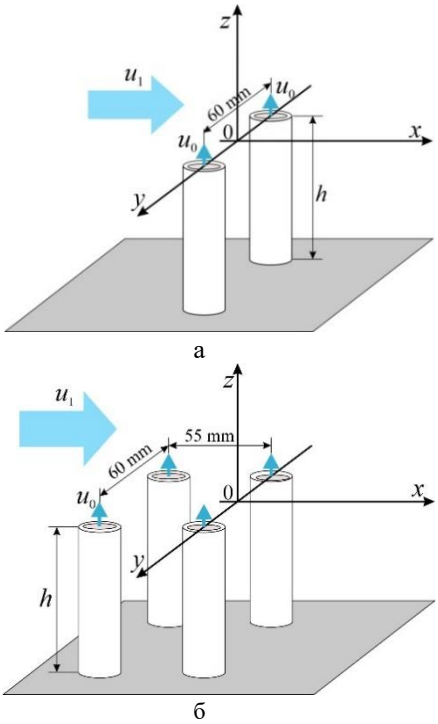


Рис.1. Измерительная схема: а – с двумя струями; б – с четырьмя струями.

Исследовался следующий режим: скорость сносящего потока $u_1 \approx 1{,}9$ м/с, скорость воздуха на выходе из трубок $u_0 \approx 4{,}6$–$4{,}7$ м/с. Для исследования процессов взаимодействия струй и потока был выбран метод визуализации течения посредством построения изолиний скорости в различных сечениях.

Исследование полей скорости показало, что траектория двойной параллельной струи (см. рис. 1(а)) ниже одиночной [1] для всех x, практически совпадая с ней для $x/d < 4$, с увеличивающимся понижением при $x/d > 4$. В [2] получено, что для двойных струй, вытекающих из форсунок заподлицо с поверхностью, траектория всегда ниже одиночной при разных отношениях скоростей и расстояния между струями.

Было получено, что траектория тандемной струи после слияния двух рядов (см. рис. 1(б)) значительно выше одиночной в ближней области. В [3] показано, что объединенное тандемное течение обеспечивает более глубокое проникновение в поперечный поток, чем одиночная струя при том же соотношении скоростей.

На рис. 2 показаны начальные траектории (максимальная скорость) рассмотренных выше струй (см. рис. 1) в сравнении с одиночной струей [1].

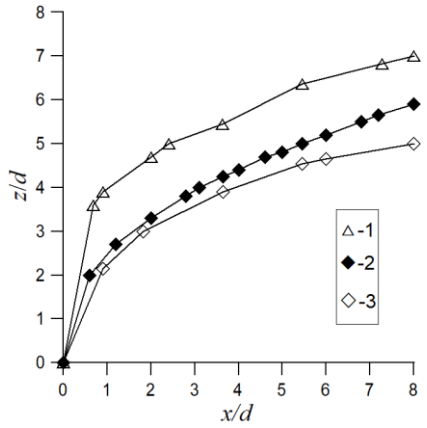


Рис. 2. Сравнительные траектории струй при $r \approx 2{,}45$: 1 – тандемная струя; 2 – одиночная струя; 3 – параллельная струя.

Список литературы:

1. Dobrosel'skii K.G. Investigation of the action of a transverse flow on injected normally vertical elevated low-head jets // J. Eng. Phys. Thermophys. 2012. Vol. 85. No. 6. P. 1390-1396.
2. Zang B., New T.H. Near-field dynamics of parallel twin jets in cross-flow // Phys. Fluids. 2017. 29(3). 035103.
3. New T. H., Zang B. On the trajectory scaling of tandem twin jets in cross-flow in close proximity // Exp Fluids. 2015. 56(11).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 19-79-30075).

УДК 662.71

ЗАЖИГАНИЕ И ГОРЕНИЕ ПЕЛЛЕТИРОВАННЫХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ ОПИЛОК И РАЗЛИЧНЫХ ГРУПП ОТХОДОВ

Дорохов В.В.[1], Няшина Г.С.[1], Шведов Д.К.[1]

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

Изменение климата вызвало необходимость в существенном уменьшении выбросов углекислого газа CO_2 со стороны энергетических предприятий и транспорта. Существенное сокращение выбросов возможно за счет снижения доли ископаемого топлива при выработке тепловой и электрической энергии, в транспортном секторе и быту. Одним из наиболее экономически эффективных путей является использование существующей инфраструктуры угольных электростанций и замена используемого топлива биомассой или смесью на ее основе. Среди различных типов биомассы наиболее распространенными формами ее использования являются пеллеты и брикеты. Для приготовления топливных пеллет и брикетов используются различные виды сырья, среди которых чаще всего применяется древесина. В настоящее время перспективными компонентами смесевых топлив являются отходы и низкосортные топлива так как, помимо увеличения выбросов парниковых газов, рост национального дохода любой страны на 1% приводит к увеличению количества образующихся отходов на 0.69%. Настоящая работа посвящена изучению механизмов повышения себестоимости отходов и низкосортных топлив при их совместном пеллетировании с биомассой, как одним из наиболее востребованных источников возобновляемой энергии. Утилизация неопасных отходов (например, картона, соломы и рисовой шелухи) и использование невостребованного сырья (торфа), путем смешивания с биомассой (опилками) для производства пеллет с целью выработки энергии является экологически выгодным подходом, способствующим восстановлению ресурсов, и эффективным для обращения с отходами. Создание пеллетированного смесевого топлива на основе биомассы и картона, торфа или сельскохозяйственных отходов позволит снизить внешнюю зависимость от импорта и одновременно способствовать диверсификации источников энергии.

Для определения характеристик процессов зажигания и горения использовался экспериментальный стенд, состоящий из камеры сгорания, высокоскоростной видеокамеры и вспомогательного оборудования. В качестве камеры сгорания использовалась электрическая трубчатая муфельная печь LOIP LF-50/500-1200 (внутренний диаметр керамической трубки 0.05 м, длина 0.5 м; диапазон варьирования температуры 100–1200 °C). Навеска топлива подавалась в камеру сгорания при помощи координатного механизма. Характеристики зажигания (времена задержки газофазного (τ_{d1}) и гетерогенного (τ_{d2}) зажигания), а также продолжительности горения (τ_b) определялись при помощи высокоскоростной видеокамеры Phantom Miro C110. Запись велась с разрешением 1024x768 пикселей и скоростью съемки 1000 кадров в секунду, погрешность измерения составляла 0.001 с. Все характеристики зажигания и горения определялись на основе 5–7 повторяющихся измерений с исключением грубых ошибок.

На рисунке 1 представлены времена задержки газофазного зажигания исследуемых топливных пеллет.

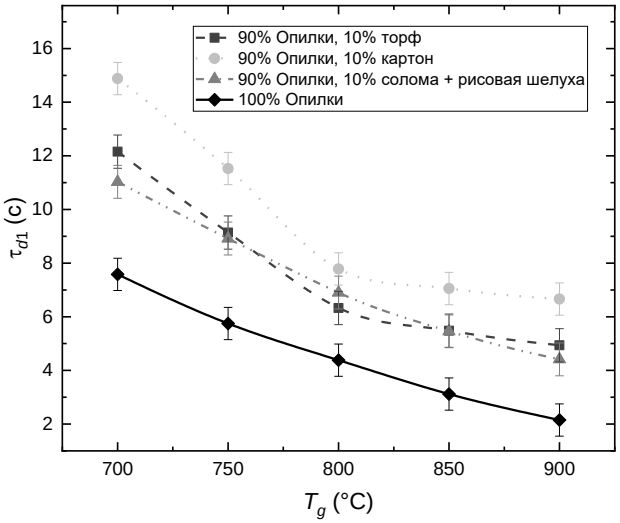


Рисунок 1 – Времена задержки зажигания исследуемых топлив

Использование добавок приводит к увеличению времен задержки газофазного зажигания топлив на величину до 80%. Причиной этого служит снижение доли летучих в составе топлива, что приводит к уменьшению скорости накопления необходимой для зажигания концентрации парогазовой среды в приповерхностном слое пеллета. Увеличение температуры окислительной среды в камере сгорания ожидаемо приводит к снижению времен задержки газофазного зажигания. При увеличении температуры в камере сгорания в диапазоне 700–900 °C времена задержки газофазного зажигания уменьшились на величину до 3.6 раз ввиду интенсификации эндотермических процессов прогрева топливных пеллет и выхода летучих с их поверхности. Наибольшее сокращение τ_{d1} наблюдается в диапазоне 700 °C≤T_g≤800 °C. Дальнейшее увеличение температуры окислительной среды снижает времена задержки газофазного зажигания не более, чем в 1.5 раза. Данный результат свидетельствует о достижении предельной скорости зажигания для топливных пеллет. Соответственно, скорость зажигания при этом ограничивается в большей мере долей летучих в составе топлива и скоростью формирования парогазовой смеси в приповерхностном слое пеллет.

УДК 532.5; 532.6

РАЗРАБОТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕЦЕПТУР ЖИДКОСТЕЙ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА С ПОМОЩЬЮ НАНОДОБАВОК

Минаков А. В.[1,2], Жигарев В. А.[1], Неверов А.Л.[1], Пряжников М. И.[1], Скоробогатова А. Д.[1]

[1] Сибирский федеральный университет,
660041, Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79
[2] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Гидравлический разрыв пласта (ГРП) считался одной из предпочтительных технологий в нефтяной промышленности на протяжении нескольких десятилетий с целью стимуляции углеводородных скважин для добычи огромных объёмов нефти и газа с 1940-х годов[1-2]. При гидроразрыве пласта вязкость играет важную роль в обеспечении достаточной ширины трещины для обеспечения входа проппанта в трещину, переноса проппанта из ствола скважины к кончику трещины, создания желаемого эффективного давления для контроля роста высоты и обеспечения контроля потерь жидкости. Широкое применение получили сшитые гели на основе гуаровой камеди. В данной работе проведено исследование по модификации сшитых гуаровых гелей различными нанодобавками для улучшения их стабильности, реологии, межфазного натяжения и смачиваемости. Использовались сферические наночастицы оксида кремния и алюминия разного размера, а также углеродные нанотрубки и нановолокна оксида алюминия. Размер наночастиц варьировался от 10 до 114 нм, массовая концентрация от 0,01 до 0,8 %.

Технология приготовления модифицированных гелей была следующая. Вначале готовилась суспензия частиц и подвергалась механическому перемешиванию на высокоскоростной мешалке в течение 15 минут с последующей ультразвуковой обработкой в течение 10 минут. Далее в суспензию добавляли требуемое количество гелеобразователя, и снова перемешивали на мешалке в течение 15 минут. Для получения сшитого геля добавляли сшиватель (натрия тетраборат в глицерине 0,1 масс.%).

Изучено влияние добавки наночастиц на коллоидную устойчивость линейных и сшитых гелей. Для этого использовался оптический анализатор Turbiscan LAB. Показано, что с увеличением концентрации наночастиц кинетика дестабилизации гелей снижалась. Было обнаружено, что индекс дестабилизации снижался при увеличении размера наночастиц. Проведено исследование коллоидной устойчивости гелей с одностенными углеродными нанотрубками. Показано, что гели с одностенными углеродными нанотрубками обладают более высокой коллоидной устойчивостью.

Проведено комплексное исследование влияния добавок наночастиц на вязкость и реологических характеристики линейных гелей. Получены зависимости реологических параметров гелей от концентрации и размера и материала наночастиц. Анализ результатов показал, что зависимость эффективной вязкости гелей от концентрации наночастиц имеют немонотонный характер. Было установлено, что добавка наночастиц при малых концентрациях увеличивает эффективную вязкость сшитых гелей, а при высоких ее снижает. Установлено, что при одинаковой концентрации наночастиц с увеличением их размера эффективная вязкость геля растёт. Гели, модифицированные наночастицами Al_2O_3, имеют более высокую вязкость, чем гели с наночастицами SiO_2. Впервые проведено исследование влияния добавок нановолокон оксида алюминия и одностенных углеродных нанотрубок. Было установлено, что малые концентрации ОСУНТ значительно повышают эффективную вязкость гелей (более чем в 4 раза). Показано, что наномодифицированные гели менее чувствительны к изменению температуры и дольше сохраняют высокую эффективную вязкость при повышении температуры.

Впервые проведены систематическое изучение влияние концентрации, размера, материала и формы нанодобавок на смачиваемость, межфазное натяжения и скорость капиллярной пропитки сшитых гелей. Изучение проводилось на с помощью тензиометра на пластинках из кварцевого стекла и пластинках песчаника со средней пористостью 22 % и проницаемостью 240 мД. Показано, что скорость впитывания наномодифицированного геля значительно уменьшается с увеличением среднего размера наночастиц.

Проведены систематические экспериментальные исследования фильтрационных потерь жидкостей для ГРП для условий с низкими и высокими давлениями. Исследовано влияние от концентрации, размера и материала нанодобавок. Установлено, что добавки рассмотренных наночастиц приводят к радикальному снижению фильтрационных потерь при условиях высоких давлений (до более чем в 10 раз в ряде случаев). Получено, что с увеличением концентрации нанодобавок фильтрационные потери гелей для ГРП снижаются.

Список литературы:

1. Shahbazi K., Abdideh M., Hadipoor M. Modelling hydraulic fracturing process in one of the Iranian southwest oil reservoirs// Applied Earth Science. 2017. V.126. No.3. P. 108-117.
2. Sutra E., Spada M., Burgherr P. Chemicals usage in stimulation processes for shale gas and deep geothermal systems: a comprehensive review and comparison // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. V. 77. P. 1-11.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-79-30022, https://rscf.ru/project/23-79-30022/.

УДК 536.423

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ БИДИСПЕРСНОГО ОБЛАКА КАПЕЛЬ

Архипов В.А., Золоторёв Н.Н., Матвиенко О.В., Перфильева К.Г., Романдин В.И.

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

Закономерности испарения капель необходимы при решении ряда прикладных задач. В большинстве практических приложений (в частности, при анализе эффективности тушения пожаров тонкораспыленным хладагентом) реализуется процесс осаждения кластера капель. При этом наблюдается эффект взаимодействия соседних капель как на скорость осаждения, так и на интенсивность испарения всего кластера [1]. Методика и результаты экспериментального исследования испарения монодисперсного кластера капель рассмотрены в [2].

В настоящем сообщении рассматривается новый метод экспериментального исследования скорости испарения облака бидисперсных капель. Результаты экспериментального исследования закономерностей движения и испарения облака бидисперсных капель позволяют более детально изучить механизм отдельных «элементарных» процессов, оценить адекватность используемых для их описания моделей и, в конечном счете, повысить достоверность физико-математических моделей и компьютерных программ расчета полидисперсных двухфазных течений.

Предложен способ получения облака бидисперсных капель, состоящего из крупнодисперсной и мелкодисперсной фракций, каждая из которых содержит капли одинакового заданного размера [3]. Способ включает формирование двух горизонтальных слоев капель при подаче жидкости из двух замкнутых цилиндрических камер, разделенных герметичной перегородкой, через два набора капилляров разного диаметра, равномерно размещенных на нижних крышках камер. Медленно повышают избыточное давление в каждой из камер до значений Δp_1, Δp_2, обеспечивающих заданное время образования капель при течении жидкости через капилляры, и обнуляют избыточное давление в камерах для образования устойчиво висящих на концах капилляров капель. Для одновременного отрыва капель каждого слоя от капилляров создают в камерах импульсы давления, причем импульс давления в камере с капиллярами большего диаметра создают с задержкой времени по отношению к импульсу давления в камере с капиллярами меньшего диаметра.

На рис. 1 представлена фотография исходного облака бидисперсных капель, образованных на концах капилляров. Бидисперсное облако образуется при отрыве верхнего слоя более крупных капель и нижнего слоя капель от концов капилляров.

Для определения скорости испарения облака капель в высокотемпературной среде использовалась установка в виде нагревателя, состоящего из трех состыкованных керамических труб с внутренним диаметром 250 мм, общая высота нагревателя составляет 1 м. На внутренней поверхности нагревателя установлены проволочные нихромовые спирали, соединенные с источником напряжения. Тепловая изоляция обеспечивается за счет покрытия наружной поверхности нагревателя тонколистовой сталью, на входе и выходе из нагревателя установлены асбестовые прокладки.

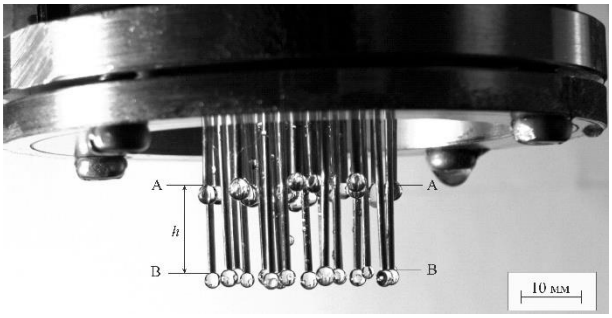


Рис. 1. Фотография исходного облака бидисперсных капель, образованных на концах капилляров

Для определения температурного поля в нагревателе предварительно измерялось распределение температур по оси трубы для различных значений мощности нагрева от 1.2 до 5.2 кВт. По измеренному полю температур рассчитывалась скорость конвективного потока воздуха в трубе. Параллельно проводились измерения скорости потока вблизи верхнего сечения торца нагретой трубы. Сравнение экспериментальных данных с результатами математического моделирования показывает хорошее соответствие. Таким образом, результаты численного моделирования могут быть использованы для исследования процесса осаждения частиц в обогреваемой трубе при наличии восходящего конвективного потока.

Для исследования скорости осаждения капель каждой из фракции, а также времени их осаждения в нагретой области проводилось численное решение динамики осаждения капли с учетом восходящего потока воздуха. Определение испарившейся доли капель проводилось измерением массы осевших капель в приемной емкости, установленной на аналитических весах под цилиндрическим нагревателем.

Список литературы:

7. Тепломассоперенос и гидродинамика в газокапельных потоках В.И. Терехов, М.А. Пахомов. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. 282 с.
8. Архипов В.А., Басалаев С.А., Коноваленко А.И., Перфильева К.Г. Испарение кластера капель при движении в высокотемпературной газовой среде // ПЖТФ. 2020. Т. 46. № 12. С. 40-42.
9. Заявка на патент № 2024111059, МПК G01F 11/00. Способ получения облака бидисперсных капель / Архипов В.А., Басалаев С.А., Золоторёв Н.Н., Романдин В.И., Поленчук С.Н. Заявл.: 23.04.2024.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00307, https://rscf.ru/project/22-19-00307/

УДК 662.71

КАРБОНИЗАЦИЯ БИОМАССЫ В СРЕДЕ CO_2 С ПОЛУЧЕНИЕМ АКТИВИРОВАННОГО УГЛЯ

Калтаев А.Ж.[1], Ларионов К.Б.[1,2], Губин В.Е.[1,3]

[1]Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, проспект Ленина, дом 30
[2]Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева,
650000, Кемеровская область – Кузбасс, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28
[3]Севастопольский государственный университет,
Россия, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

Опасения, вызванные изменением климата и растущим спросом на энергию, приводят к развитию технологий, связанных с возобновляемыми источниками энергии. Одним из наиболее перспективных возобновляемых источников энергии является биомасса. Биомасса как энергетическое топливо обладает рядом недостатков, к которым относятся естественное разложение, не высокая энергетическая ценность и низкая насыпная плотность. Для исключения данных недостатков используют различные методы термической конверсии, например, газификация. Основным продуктом газификации биомассы является синтез-газ. Перед сжиганием синтез-газа необходимо отделить CO_2 для увеличения теплоты сгорания и приблизить её к природному газу. Наиболее распространенными способами сепарации CO_2 являются химическая абсорбция в водных растворах смесей аминов [1], применение многоступенчатых мембран с использованием полимерных материалов [2] и адсорбция в пористых материалах в неподвижном слое [3]. Химическая абсорбция является наиболее распространенным методом, однако существует дополнительная потеря энергии, возникающая на этапе регенерации. Адсорбция в пористых материалах является новой альтернативной для отделения CO_2 из-за ее относительно низкой стоимости и высокой энергоэффективности. Углеродные материалы с высокой удельной площадью и развитой пористой структурой применяются в качестве потенциальных адсорбентов из-за высокой способности к адсорбции CO_2 [4].

Для производства такого материала можно использовать углеродный остаток, полученный в процессе пиролиза или карбонизации биомассы. Так карбонизация биомассы в среде CO_2 дает необходимые текстурные характеристики и не требует дополнительной активации.

В настоящей работе исследованы текстурные характеристики углеродного материала, полученного в процессе карбонизации биомассы в среде CO_2 под воздействием лучистого потока тепла.

Карбонизация биомассы осуществлялась в трубчатом реакторе с электрическим нагревом и продуваемым CO_2. Температура в реакторе варьировалась в интервале от 600 до 1000 °C, время выдержки составляет 2 минуты. Расход CO_2 составил 1 л/мин. В качестве биомассы был использован образец березовых опилок. Фракционный состав опилок составлял 5-10 мм.

Текстурные характеристики образцов углеродного остатка были определены на анализаторе *Sync 420A (3P Instruments,Germany*). Подготовка образца заключалась в предварительном удалении внешней влаги на дегазаторе в течение 10 часов при 200 °C в вакууме. Удельная площадь поверхности образца рассчитывалась методом Брунауэра-Эммета-Теллера.

Результаты удельной площади поверхности частиц, исследуемых образцов углеродного остатка, полученных при различных температурах приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Удельная площадь поверхности частиц

Температура в реакторе, °C	Удельная площадь поверхности, $м^2/г$
600	316,8
700	355,8
800	494,7
900	807,3
1000	620,7

Увеличение площади поверхности в интервале температур от 600 до 900 °C связана со значительным выходом летучих веществ. Это способствует развитию пор и каналов, что увеличивает удельную площадь поверхности. Дальнейшее увеличение температуры приводит к уменьшению площади поверхности. Вероятнее всего это связано с расширением пор и/или слиянием соседних пор.

Список литературы:

1. Spigarelli B.P., Kawatra S.K. Opportunities and challenges in carbon dioxide capture // J. CO2 Util. 2013. Vol. 1. P. 69–87.
2. Zhang X., He X., Gundersen T. Post-combustion Carbon Capture with a Gas Separation Membrane: Parametric Study, Capture Cost, and Exergy Analysis // Energy & Fuels. 2013. Vol. 27. No. 8. P. 4137–4149.
3. Baxter J., Bian Z., Chen G., Danielson D., Dresselhaus M.S., Fedorov A.G., Fisher T.S., Jones C.W., Maginn E., Kortshagen U., Manthiram A., Nozik A., Rolison D.R., Sands T., Shi L., Sholl D., Wu Y. Nanoscale design to enable the revolution in renewable energy // Energy Environ. Sci. 2009. Vol. 2 No. 6. P. 559.
4. Grande C.A. Advances in Pressure Swing Adsorption for Gas Separation // ISRN Chem. Eng. 2012. Vol. 2012. P. 1–13.

Работа выполнена при поддержке гранта FSWW-2022-0018, реализуемого в рамках проекта создания новых молодежных лабораторий.

УДК [533+536]:51-73

МЕТОДЫ ЛОКАЛЬНОЙ И ГЛОБАЛЬНОЙ АППРОКСИМАЦИИ РЕШАТЕЛЯ ЗАДАЧИ РИМАНА

Королева М.Р.[1], Тененев В.А.[1,2]

[1] Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,
426067, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, д. 34
[2] Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,
426069, Россия, Ижевск, ул, Студенческая 7

Для сложных нелинейных систем, таких как уравнения Эйлера, описывающие нестационарное движение невязкого нетеплопроводного газа, точное решение задачи Римана находится из решения нелинейной системы алгебраических уравнений для промежуточных состояний и связывающих их волн [1]. Это можно сделать с произвольной точностью, за счет соответствующих вычислительных затрат. Стоимость точного решения одной задачи Римана может показаться незначительной, но она может стать слишком дорогой, если решатель Римана используется в качестве строительного блока в методе конечных объемов при проведении сложных трехмерных нестационарных расчетов. В этом случае задача Римана должна решаться на каждой грани каждой расчетной ячейки на каждом временном шаге и при решении практических задач в двух или трех пространственных измерениях нередко требуется решение огромного количества задач Римана.

В контексте применения точных решений актуальной задачей является разработка эффективных приближенных решателей Римана, которые быстро дают достаточно хорошее приближение к истинному решению Римана. Известные подходы для построения таких решений, использующие линеаризацию римановского решателя, кусочно-линейную или кусочно-квадратичную интерполяции рассмотрены для широкого круга задач в случае идеальных или совершенных газов [2, 3]. Для реальных газов, описываемых сложными уравнениями состояния типа Ван-дер-Ваальса, Соаве-Редлиха-Квонга, Пенга-Робинсона, Ми-Грюнейзена [4, 5] аппроксимация точного решения задачи Римана более актуальна, т.к. эти уравнения используются для описания поведения высокомолекулярных веществ в областях неклассического поведения газов [6].

В данной работе рассматриваются методы локальной и глобальной аппроксимации римановского решателя на примере уравнения состояния Соаве-Редлиха-Квонга для низкомолекулярных и высокомолекулярных веществ, в том числе в области неклассического поведения газа.

Уравнение состояния Соаве-Редлиха-Квонга не позволяет однозначно выразить внутреннюю энергию e и энтропию газа S через давление p и плотность ρ, не используя температуру T [5]. Основные термодинамические соотношения для реального газа в безразмерной форме в этом случае записываются следующим образом:

- уравнение состояния: $p = \dfrac{8T\rho}{3(1-B_S\rho)} - \dfrac{A_S\alpha(T)\rho^2}{1+B_S\rho}$,
- внутренняя энергия: $e = \dfrac{8T}{3\delta} + \dfrac{A_S}{B_S}\ln(1+B_S\rho)^{\chi(T)}$,
- энтропия газа $S = \ln\left[T^{1/\delta}\,\dfrac{1-B_S\rho}{\rho}(1+B_S\rho)^{\beta(T)}\right]$.

В данных уравнениях приняты следующие обозначения: $\alpha(T)$ – модифицирующая функция, учитывающая свойства реальных газов, определяющая значение вспомогательных функций $\chi(T)$ и $\beta(T)$, δ – характеристика вещества, A_S = 3.0399и B_S = 0.23104 [4].

Одной из трудоемких задач при нахождении точного решения является интегрирование в волне разрежения. Температура и плотность газа связаны посредством сложного нелинейного уравнения, которое в зависимости от исходных данных может иметь от одного до трех корней, расположенных близко друг к другу. В свою очередь температура и давление связаны через квадратное уравнение, которое так же содержит плотность газа. Решение системы из двух таких уравнений является затратным, кроме того данная система очень требовательна к начальному приближению.

Приближенное решение строится для уравнений, определяющих скорость газа на волнах, связывающих исходные состояния. Для построения приближенного решения используются - линеаризация уравнений методом касательных, глобальное интерполирование бикубическими сплайнами, а также локальная аппроксимация двучленным уравнением состояния. Сравнение используемых подходов проводится на примере решения задачи распада разрыва в осесимметричной трубе. Рассматриваются высокомолекулярные вещества с показателем δ = 0.0128, 0.008 и вещества с δ = 0.4.

Список литературы:

1. Численное решение многомерных задач газовой динамики / С.К. Годунов, А.В. Забродин, М.Я. Иванов, А.Н. Крайко, Г.П. Прокопов. М: Наука, 1976. 400с.
2. Van Leer B. Towards the ultimate conservative difference scheme V: A second-order sequel to Godunov's method// J. Comp. Phys. 1979. V. 32. P. 101-136.
3. Меньшиков И.С. Обобщенная и вариационная постановка задачи Римана с приложением к развитию метода Годунова// Журнал вычислительной математики и математической физики. 2020. Т. 60. № 4. С. 663-675.
4. Raeder T., Tenenev V.A., Koroleva M.R., Mishchenkova O.V. Nonlinear processes in safety systems for substances with parameters close to a critical state // Russian Journal Nonlinear Dynamics. 2021. Vol. 17, iss. 1. Pp. 119–138.
5. Тененев В.А., Королева М.Р. Постановка задачи Римана для политропных газов, описываемых сложными уравнениями состояния // Химическая физика и мезоскопия. 2023. Т. 25, № 4. С. 507–514.
6. Quartapelle L., Castelletti L., Guardone A., Quaranta G. Solution of the Riemann problem of classical gasdynamics // Journal of Computational Physics, 2003. V. 190. Pp. 118-140.

УДК 51-72

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ГИДРОРАЗЫВУ ГРАНИТНЫХ ОБРАЗЦОВ

Лапин В.Н. [1], Станчиц С.А.[2], Филев Е.А.[3]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] ООО "Лабадванс",
121205, Россия, Москва, ул. Сикорского, 11
[3] Сколковский институт науки и технологий,
121205, г. Москва, территория «Сколково», Большой бульвар, д. 30 стр.1

В работе приведены результаты моделирования распространения трещин гидроразрыва в гранитных образцах при закачке в трещину жидкостей различной вязкости и выполнено сравнение параметров трещин, полученных в результате вычислительного и лабораторного экспериментов.

Использование в экспериментах гранита, характеризующегося низкой проницаемостью, гранита позволяет при гидроразрыве пласта закачивать жидкость с малым расходом, не опасаясь утечки ее из трещины. Это обеспечивает относительно низкую скорость распространения трещины, и этот процесс может с высокой точностью наблюдаться с помощью акустического мониторинга и достаточной частоты измерений давления в скважине. Кроме того, гранит является наиболее частым материалом, составляющим петротермальные резервуары (hot dry rock, HDR), что делает эксперименты по гидроразрыву гранитных образцов наиболее подходящими для исследования способов их стимуляции.

Хотя на основе экспериментов могут быть построены достоверные и надежные связи между варьируемыми параметрами (выбор жидкости, скорости закачки, температуры, сжимающих напряжений в образце) с давлением и характеристиками получившихся трещин, обобщение этих зависимостей на масштаб реальных месторождений (углеводородов или петротермальной энергии) возможен только на основе математического моделирования. Также, валидация моделей путем сравнения с экспериментами на гранитных образцах, позволяет исключить из рассмотрения утечку жидкости в породу и более надежно определить влияние и качество описания моделями остальных факторов, определяющих распространение трещины гидроразрыва: движение жидкости, деформацию и разрушение материала.

Использованная в настоящей работе модель радиальной трещины гидроразрыва [1] является классической и поэтому многократно валидированной. Она широко используется для верификации новых разрабатываемых моделей в качестве частного случая, поэтому ее уточнение позволяет повысить качество и более современные модели. Для сравнения с экспериментами была использована уже верифицированная на точных решениях численная реализация этой модели [2], в которую была добавлен учет взаимодействия с системой подачи жидкости. Эта модификация обусловлена тем, что при нагнетании давления система подачи жидкости за счет своей сжимаемости накапливает энергию. Эта энергия высвобождается в момент инициации тещины, что делает величину расхода в трещину неизвестной, а модели, использующие ее в качестве входного параметра, неприменимыми.

В работе проведена валидация модели и ее численной реализации путем сравнения с результатами эксперимента по гидроразрыву образца из полиметилметакрилата, результаты которого описаны в [2] в удобной для валидации модели форме. Хорошее соответствие результатов моделирования и лабораторных измерений получено как в [3], так и в настоящей работе. Однако при применении той же модели для описания распространения трещины в гранитных образцах [4,5] скорость распространения трещины была существенно завышена, тогда как давление в скважине существенно занижено. При этом искусственное увеличение в модели гидравлического сопротивления трещины позволяет получить хорошее совпадение предсказанных параметров трещины с наблюдаемыми в эксперименте. Это может свидетельствовать о значительном влиянии шероховатости берегов трещины в гранитных образцах на ее гидравлическое сопротивление, что не учитывается обычно используемым в моделях гидроразрыва решением задачи о течении жидкости в плоском канале (течение Пуазейля).

Список литературы:

1. Abe H., Mura T., Keer L.M. Growth rate of a penny-shaped crack in hydraulic fracturing of rocks // J. of Geophys. Res. 1976. v. 81. N 29. p. 5335–5340.
2. Lapin V.N., Esipov D.V. Simulation of proppant transport and fracture plugging in the framework of a radial hydraulic fracturing model // RJNAMM. 2020. v. 35. N. 6, p. 325-339.
3. Lecampion B., Desroches J., Jeffrey R.G., Bunger A.P. Experiments versus theory for the initiation and propagation of radial hydraulic fractures in low-permeability materials // J. of Geophys. Res.: Solid Earth. 2017. v. 122. N. 2. p. 1239-1263.
4. Shevtsova A., Stanchits S., Bobrova M., Filev E., Borodin S., Stukachev V., Magadova L. Laboratory study of the influence of fluid rheology on the characteristics of created hydraulic fracture // Energies. 2022. v. 15. N. 11. p 3858.
5. Shevtsova A., Stanchits S., Filev E., Karamov T., Stukachev V., Spasennykh M.. Assessment of saturation effect on hydraulic fracturing in sandstone and thermally treated granite. // Minerals. 2023. v. 13. V. 6. p. 777.

УДК 533.6.011, 53.072.001.57; 53.072.086.48.

ПРИМЕНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ МЕТОДОВ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДЛЯ АНАЛИЗА СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В ПРИЗЕМНОЙ ОБЛАСТИ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ

Мешкова В.Д.[1,2], Дектерев Д.А.[1,2], Шульженко П.Д.[1], Дектерев А.А.[1,2]

[1] Сибирский Федеральный Университет,
660041, Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79
[2] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Для исследования аэродинамики городских микрорайонов применяются методы физического моделирования в аэродинамических трубах [1-2]. Для получения качественных и количественных интегральных данных, как правило, применяется метод оптической визуализации течения – PIV (Particle Image Velocimetry) [3]. Говоря о комфортной среде для человека, наибольший интерес представляет область, максимально приближенная к земной поверхности. Однако оптические методы теряют часть информации, так как при использовании лазерного ножа область у поверхности засвечивается отраженным излучением, в итоге на фоне такой поверхности трассеры становятся неразличимы для камеры.

Одним из традиционных методов визуализации структуры течения у поверхности является саже-масляная визуализация. По сути этот метод отображает распределение коэффициента трения на поверхности. Для реализации метода, на поверхность наносится жидкость с добавлением контраста. Зачастую в роли жидкости используют керосин, в случае больших скоростей для уменьшения текучести (повышения вязкости) в керосин можно добавить моторное масло. В качестве контраста используются мелкодисперсные порошки-красители. Исторически использовалась сажа, что и дало название методу. В настоящей работе использовались флуоресцентные красители.

Апробация метода проведена в аэродинамической трубе при исследовании аэродинамики моделей в форме куба. В работе использовался осветительный керосин с добавлением флуоресцентного красителя. Скорости для получения картин течения составляли 7,8 и 15,6 м/с (Характерные числа Рейнольдса Re = 25 000 и 50 000 для модели H = 0,05м и Re = 50000 и 100000 для модели H = 0,1 м). На рис.1 приведены картины течения обтекания кубов разного размера при разных числах Re.

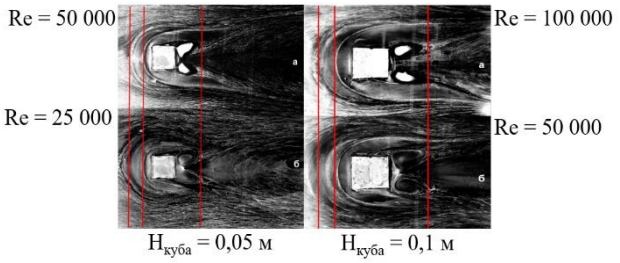


Рис. 1. Р*езультаты саже-масляной визуализации обтекании кубов разных размеров*

Аналогичная методика применена для визуализации картин течения у поверхности земли для различных видов городской застройки. Данный эксперимент проводился с использованием аэродинамической стены, скорость потока составляла 10 м/с.

В дальнейшем результаты саже-масляной визуализации использованы для сопоставления с полями напряжения на поверхности, полученными в ходе численного моделирования (рис. 2). Отчетливо видны линии тока и зоны формирования вихревых структур.

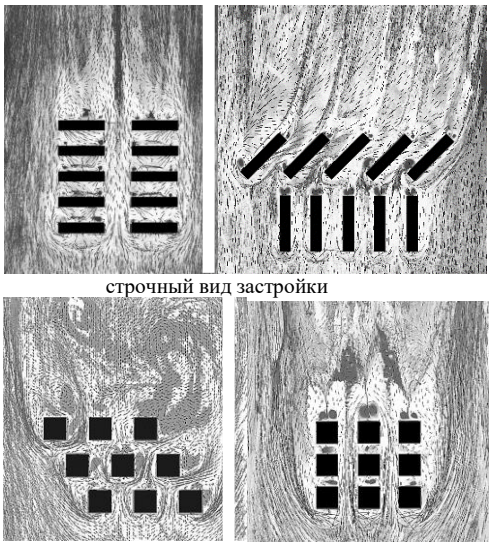


Рис. 2 Сопоставление результатов саже-масляной визуализации с полями напряжения на поверхности, полученными в ходе численного моделирования

Анализируя результаты численного моделирования, путем наложения векторных полей напряжения на изображения структур, полученных при саже-маляной визуализации, можно отметить корреляцию формирования характерных аэрационных режимов (областей с локальным ускорением ветра, зон рециркуляции и крупномасштабных вихревых структур).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-61-00098, https://rscf.ru/project/22-61-00098/

Список литературы:

1. Scalar fluxes from urban street canyons. Part 1: laboratory simulation / Barlow J. F. // Bound.-Layer Meteor. – 2004. – 113. – 4. – P 369-385.
2. Near wall flow over urban-like roughness. Bound / Cheng H. // Layer Meteor. – 2002. – 104. – P 229-259.
3. Complex Use of the PIV Method. A Review / Vasileva I. L., Nemova D. V. // AlfaBuild. – 2021. – 16.

УДК 662.739

ФРАКЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ УГЛЯ И ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ ПОСЛЕ ИХ СОВМЕСТНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Мисюкова А.Д.[1, 2], Янковский С.А.[1,2], Берикболов А.К.[1], Есин К.С.[1]

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

[2] Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
650000, Россия, Кемерово, ул. Весенняя, 28

Непрерывное технологическое развитие в мире сопровождается неминуемым ростом потребления электрической энергии. Мировой спрос на электроэнергию в 2023 году увеличился на 2,2 % по сравнению с 2022 годом [1]. И по-прежнему угольное топливо остается одним из самых распространенных и потребляемых в мире. Ежегодно его продолжают сжигать в больших масштабах, что приводит к массовому выделению углекислого газа в атмосферу. В России ежегодно добывается более 400 млн тонн угольного топлива, поэтому последствия угольной добычи и использования его на тепловых электрических станциях в РФ крайне важны. Поиск альтернативных, более экологичных топлив, например, нетрадиционных видов источников в качестве замены твердому топливу по-прежнему экономически не выгодно, в большей степени из-за того, что до сих пор нет дешевых технологий для хранения энергии. До тех пор, пока подобные технологии не будут массовыми и доступными для внедрения в энергетический цикл – стране и миру придется рассчитывать на традиционные источники энергии, такие как нефть, газ и уголь. Простым решением для снижения уровня выбросов от сжигания угля в атмосферу является использование смесевых видов топлив. В мире проводятся исследования по сжиганию смесевых топлив на основе угля и различных лигноцеллюлозных материалов [2]. Однако, при использовании таких видов топлив возникают вопросы их транспортировки, измельчения, смешения и подачи в котельный агрегат. Целью данной работы является изучение размеров частиц древесно-угольного топлива, измельчаемого и смешиваемого в барабанной шаровой мельнице в течение 8 часов.

Объектом исследования являлась топливная смесь, образованная из Балахтинского угля марки 3Б и древесных опилок, предоставленных предприятием ООО «Дзержинский ЛПК». Угольные частицы, просеянные через сито с размером ячеек 1000 мкм смешивались с древесными опилками в различных концентрациях по массе с общим весом 200 грамм смеси помещались в барабанную шаровую мельницу. Процесс смешивания и измельчения выполнялся в течение 8 часов. После измельчения топливные смесь фракционировались на стандартизированной системе сит с размером ячеек от 1000 до 80 мкм в течение 10 минут, остаток на каждом сите взвешивался на высокоточных весах. Результаты фракционного исследования приведены в таблице 1 (в граммах).

Табл. 1. Результаты фракционного анализа

Фракция, мкм / Концентрация, %	D_{1000}	D_{500}	D_{200}	D_{80}
У-100	180,4	89,6	13,5	6,9
У-90 / Д-10	134,1	66,9	13,8	5,3
У-75 / Д-25	128,6	58,2	11,2	2,9
У-50 / Д-50	101,1	40,3	8,2	1,3

*прим. R_{1000} – остаток на сите с размером ячеек 1000 мкм, D_{1000} – проход через сито с размером ячеек 1000 мкм.

Из анализа таблицы 1 видно, что с увеличением доли древесных опилок количество смеси, оставшейся на ситах с ячейками меньшего размера, уменьшается. При добавлении 10% опилок через сито с ячейками 1000 мкм прошло 67 % смеси, через сито 500 мкм – 33,5 %, через сито 200 мкм – 7 %. Для смеси с концентрацией 75 % / 25 % остаток на сите сито с размером ячеек 500 мкм уменьшился и составил 29% от загружаемой в мельницу смеси. Для бурого угля как нормативные характеристики тонины помола используются остатки на ситах 500 и 200 мкм. По данным рассева была построена интегральная зерновая характеристика (рис. 1).

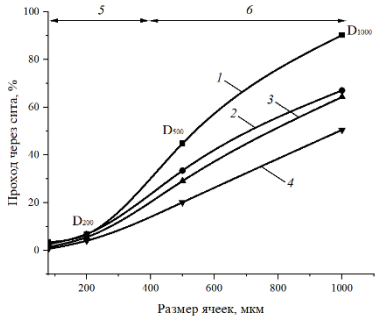


Рис. 1. Интегральная зерновая характеристика, полученная на шаровой барабанной мельнице. 1 – У-100, 2 – У-90/Д-10, 3 – У-75/Д-25, 4 – У-50/Д-50, 5 – область тонких фракций пыли, 6 – область грубых фракций пыли

Исходя из анализа результатов исследования, пыль смесевых топлив всех концентраций можно охарактеризовать как грубую пыль, так как остаток на сите составил $R_{200} > 30$ %. Следует сделать вывод, что 8 часов помола недостаточно для массового формирования топливных смесей на основе бурых углей и древесных отходов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № FZES-2024-0001.

Список литературы:

[1] “Добыча угля в октябре в России достигла максимума с начала года - Ведомости.” Accessed: Mar. 07, 2024. [Online]. Available: https://www.vedomosti.ru/business/articles/2023/11/29/1008446-dobicha-uglya-maksimuma

[2] S. Piboonudomkarn et al., “Co-hydrothermally carbonized sewage sludge and lignocellulosic biomass: An efficiently re-newable solid fuel,” Arabian Journal of Chemistry, vol. 16, no. 12, p. 105315, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.ARABJC.2023.105315.

УДК 621.57

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АБСОРБЦИОННЫХ БРОМИСТОЛИТИЕВЫХ И ХЛОРИСТОЛИТИЕВЫХ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ ПОВЫШАЮЩЕГО ТИПА В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Мухин Д.Г.[1, 2], Степанов К.И.[1], Елистратов С.Л.[2],

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] Новосибирский государственный технический университет,
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Абсорбционные холодильные машины и тепловые насосы являются высокоэффективным теплоиспользующим и энергосберегающим оборудованием. В качестве основного рабочего тела - абсорбента в данном оборудовании используется водный раствор бромида лития. Поэтому основное распространение получили абсорбционные бромистолитиевые холодильные машины (АБХМ), которые применяются для получения искусственного холода положительных температур и абсорбционные тепловые насосы (АБТН), которые применяются в процессах с утилизацией тепла сбросных источников и подогрева среды в теплоэнергетики и промышленного производства.

Тепловые насосы АБТН подразделяются на тип I – понижающий и тип II – повышающий. Понижающий АБТН используется в процессах утилизации сбросного тепла, такого как оборотная вода после конденсаторов паровых турбин, сбросные дымовые газы котельных и ТЭЦ. Продуктом данных АБТН, является нагретая среда с температурой до 80 °С. Характерной особенностью и недостатком понижающих АБТН является то, что для своей работы они требуют высокопотенциального источника тепловой энергии, такого как – природный газ, либо водяной пар с давлением до 0,9 МПа.

Схема повышающего АБТН представлена на рисунке 1. Повышающие АБТН в мире в основном используются в производственных процессах связанных с дистилляцией и. Источником энергии для данных АБТН является сбросное тепло в виде вторичного пара. Продуктом в АБТН является нагретая жидкость либо пар с температурой на 20 – 25 ° чем температура сбросного источника. Недостатком повышающего АБТН является то, что для его работы требуется низкопотенциальный источник охлаждающей среды с температурой существенно ниже чем у сбросного источника (к примеру для сбросного источника с температурой 90 °С необходим источник охлаждающей среды с температурой 27 – 30 °С). В связи с этим большой перспективой является применение повышающих АБТН для автономных систем отопления в удалённых районах РФ, где имеются в наличии самоизливные геотермальные источники с температурой 40 – 50 °С [1]. В этом случае геотермальная вода является источником энергии АБТН. Продуктом является вода, нагретая на 15 – 20 °С по сравнению с геотермальной водой. В качестве источника охлаждающей среды можно использовать атмосферный воздух, который в зимний период, на большинстве территории РФ, имеет отрицательные температуры.

В качестве альтернативного рабочего тела, в повышающих АБТН может быть использован водный раствор хлорида лития. Преимуществом хлорида лития над бромидом лития является его низкая стоимость и меньшая коррозионная активность. Недостатком является меньшая растворимость в воде и как следствие меньшая абсорбционная способность.

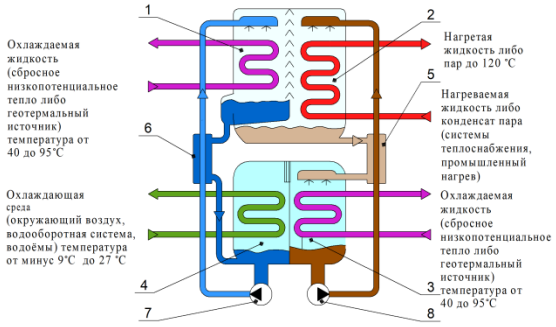


Рис. 1 Принципиальная схема повышающего АБТН 1 – испаритель; 2 – абсорбер; 3 – генератор (десорбер); 4 – конденсатор; 5 – растворный теплообменник; 6 – теплообменник хладагента; 7 – насос хладагента(воды); 8 – насос раствора;

Энергетическая эффективность повышающего АБТН выражается коэффициентом трансформации, показывающего отношение производимого тепла высокого потенциала к количеству утилизируемого тепла.

$$\eta = \frac{Q_h}{Q_u},$$

где: Q_h –производимое тепло в абсорбере АБТН, Вт; Q_u – утилизируемое тепло в испарителе и генераторе АБТН, Вт.

Теоретические расчёты для бромида и хлорида лития показывают, что значения достижимого коэффициента трансформации повышающего АБТН сравнимы для двух рабочих тел и стремятся к 0,5 в условиях наиболее высоких температур – утилизируемой среды 90 – 95 °С и нагретой среды 115 – 120 °С.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН (№ 121031800229-1)

Список литературы:

1. Алексеенко С.В., Мухин Д.Г., Степанов К.И., Елистратов С.Л., Миронова Н.В. Оценка эффективности применения абсорбционных тепловых насосов повышающего типа для теплоснабжения на основе среднетемпературных геотермальных источников// Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2023, – №3 (60) – с. 46-55. DOI: 10.17212/1727-2769-2023-3-46-58

УДК 53.06, 533.6.08, 53.072, 004.942, 66-932.42

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПНЕВМОИМПУЛЬСНОЙ ОЧИСТКИ ГАЗОХОДОВ ЭЛЕКТРОЛИЗНЫХ КОРПУСОВ АЛЮМИНИЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА ОТ ПЫЛЕВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Необъявляющий П.А.[1,2], Дектерев А.А.[1,2], Дектерев Д.А.[1,2], Бойков Д.В.[1,2], Платонов Д.В.[2]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] Сибирский федеральный университет,
660074, Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79

При электролитическом производстве алюминия образуется пылегазовая смесь, которая после частичного термического обезвреживания смолистых и горючих компонент газа удаляется системой газоотсоста. Система газоотсоста представляет сложную разветвленную, протяженную сеть газоходов различных диаметров, которая собирает пылегазовые выбросы от электролизеров бригады (порядка 20 электролизеров) и транспортирует их в систему газоочистки. Основные требования, предъявляемые к работе системы газоотсоста, заключаются в обеспечении необходимого объема газоудаления от всех электролизеров бригады.

В настоящее время на алюминиевых заводах компании РУСАЛ для предотвращения формирования пылевых отложений в сети газоходов системы газоочистки электролизных корпусов внедряется система автоматической пневмоимпульсной очистки. Система представляет собой ряд пневмоимпульсных устройств (пневмогенераторов), установленных на трубопроводах системы газоотсоса корпуса электролиза, подключенных к воздуховоду сжатого воздуха и управляемых системой автоматического управления.

Целью работы являлась разработка технические решения по усовершенствованию системы автоматической пневмоимпульсной очистки на основе метода математического моделирования.

Для получения исходных данных были выполнены натурные экспериментальные исследования теплотехнических параметров газовых потоков в газоходах, определены места формирования и толщины слоя пылевых отложений. Произведен отбор образцов пыли из отложений в газоходах системы газоотсоса, исследованы физико-химические свойства отложений и их поведение в газоходах.

С целью исследования параметров работы коммерчески доступных пневмогенераторов ПГ 25/8 и ПиНУ-25-1, а также верификации математической модели была изготовлена и оснащена оборудованием специализированная экспериментальная установка (рис. 1).

Исследования пневмогенераторов выполнялись в зависимости от давления воздуха в форкамере, угла установки выхлопного сопла на газоходе и диаметра газохода. Для этого измерительные участки установки были выполнены из участков газохода длиной 3 метра диаметром 219, 325, 426 мм. Каждый измерительный участок имел 2 патрубка для крепления пневмогенераторов, установленных под углами 20° и 30° к оси газохода.

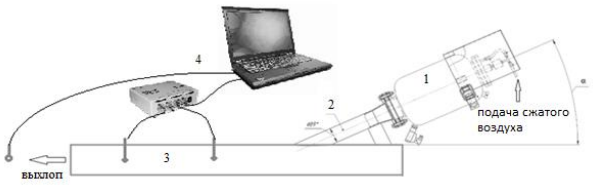


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследований параметров работы пневмогенераторов ПГ 25/8 и ПиНУ-25-1: 1 – пневмогенератор; 2 – патрубок, врезанный в газоход, на котором закрепляется пневмогенератор; 3 – измерительный участок; 4 – измерительная система приборного и визуального контроля параметров работы пневмогенераторов

На специализированной экспериментальной установке были выполнены измерения:

- динамики давления в пневмогенераторах;
- пульсаций давления в газоходе;
- температуры воздуха на входе в газоход;
- скорости воздушного потока в газоходе.

Также на экспериментальной установке было установлено, что полный унос пылевых отложений происходит при скорости потока в газоходе 16 и более м/с. Данная величина была выбрана в качестве основного критерия при разработке рекомендаций по усовершенствованию системы автоматической пневмоимпульсной очистки газоходов.

Для расчетного исследования системы автоматической пневмоимпульсной очистки газоходов была разработана пространственная нестационарная математическая модель движения сжимаемого вязкого газа в газоходах. Для моделирования турбулентного течения была выбрана двухзонная двухпараметрическая модель Ментера SST, для связи полей скорости и давления использовалась SIMPLEC-процедура. Поскольку в данной задаче необходимо моделировать газодинамические процессы при открытии клапана, движение клапана моделировалось при помощи метода динамических сеток.

В результате выполненных расчетных и оптимизационных исследований системы пневмоимпульсной очистки газоходов от отложений были разработаны рекомендаций по типу, количеству, местам установки, режимам и алгоритмам работы пневмогенераторов на газоходах различных конфигураций электролизных корпусов АО «РУСАЛ Красноярск» и АО «РУСАЛ Новокузнецк». Разработанные технические решения были апробированы на действующем производстве.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН4

УДК 621.311

ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭНЕРГОУСТАНОВОК НА ОСНОВЕ ПОЛУОТКРЫТОГО ЦИКЛА НА УГЛЕКИСЛОМ ГАЗЕ

Садкин И.С.[1,2], Щинников П.А.[2]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] Новосибирский государственный технический университет,
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Современная климатическая повестка связана со снижением роста температуры на планете и требует сокращения антропогенного выброса парниковых газов и других загрязняющих веществ в атмосферу. Одним из основных источников его выброса является энергетика на органическом топливе. На этом фоне активно развивается направление, связанное с созданием новых CO_2 циклов, где углекислый газ используется в качестве рабочего тела. В этом случае не требуется применение систем улавливания CO_2 из продуктов сгорания, а его избыток может выводиться из цикла под рабочим давлением и сразу направляться трубопроводным транспортом к месту захоронения в подземном горизонте.

Вместе с тем, единообразный подход к классификации схем энергоустановок на основе CO_2 циклов, определению их эффективности, структуры затрат энергии и капиталовложений в исследованиях отсутствует, что затрудняет сравнение различных вариантов CO_2-циклов как между собой, так и с другими известными технологиями производства электроэнергии.

Целью исследования является анализ особенностей функционирования различных конфигураций кислородно-топливных энергетических циклов с использованием диоксида углерода в качестве рабочего тела с определением отличительных черт в части их функционирования в сравнении с традиционными энергоустановками.

В основе базовых технологических решений, принимаемых к анализу, лежит сжигание газообразного топлива в кислородной среде с получением в качестве продуктов сгорания CO_2 и H_2O, из которых образуют рабочее тело цикла. Воду выводят из цикла в системе регенерации в процессе ее конденсации, а избыток CO_2 направляют на захоронение. Чистота углекислого газа, как и степень его улавливания, в данном случае стремится к 100%. Оставшаяся часть углекислоты рециркулирует в цикле и попадает в систему регенерации. Так как обновление рабочего тела происходит в процессе сжигания топлива, характеристики (состав, теплота сгорания) данного топлива определяет состав и количество добавки рабочего тела в камере сгорания. Чем выше требуется температура рабочего тела, тем больше нужно подвести энергии, тем больше требуется сжечь топлива. Соответственно, возрастает доля обновления/вывода рабочего тела. С другой стороны, доля обновления рабочего тела определяет баланс масс между потоками в системе регенерации, что влияет на сходимость энергетических балансов и может негативно сказываться на общей эффективности цикла. Кроме того, величина обновления/вывода CO_2 определяет затраты на сжатие данного потока и затраты на его захоронение. При этом все перечисленные факторы увязаны с процессом в камере сгорания, т.е. с типом топлива.

Большое значение имеет содержание водяных паров в составе рабочего тела – углекислоты. Предварительные оценки показывают, что присутствие в составе рабочего тела 1% воды (по массе) обеспечивает 5% теплового потока в системе регенерации. Причем величина содержания воды напрямую зависит от состава сжигаемого в камере сгорания топлива и обуславливается содержанием водорода в его составе. Тщательный учет вклада водяных паров является важной задачей при определении эффективности энергоустановки на основе цикла на углекислом газе.

Другой отличительной особенностью энергетических циклов на углекислом газе является достижение максимума термодинамической эффективности, после которого наблюдается снижение КПД, вызванное особенностями работы системы регенерации. Подобное поведение не характерно для традиционных энергоустановок, используемых сегодня в тепловой энергетике. Достижение максимума эффективности связано со сходимостью энергетических балансов системы регенерации, вызванных дисбалансом массовых расходов нагреваемого и греющего потоков. Чем больше величина вывода (обновления) CO_2 и водяных паров, тем ранее наступает «перегиб» графика зависимости КПД от термодинамических параметров входа рабочего тела в турбину.

Учитывая характерные особенности функционирования подобных циклов, разрабатывается универсальный подход к определению эффективности энергоустановок на базе CO_2-циклов. Ведется сопоставление результатов как между различными конфигурациями цикла на углекислом газе в поисках оптимального варианта, так и с широко используемыми в энергетической практике схемами ГТУ, ПСУ, ПГУ в целях установления границ конкурентоспособности. Результаты и разрабатываемые методики предлагаемого исследования могут масштабироваться, и применяться при анализе развития других направлений энергетического хозяйства, могут быть использованы при принятии решений в области создания новой и перспективной энергетической техники и технологий, в области развития региональных энергетических систем в условиях необходимости сокращения вредных выбросов при масштабном использовании органического топлива.

УДК 550.36: 624.139

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ФУНДАМЕНТОВ ЗДАНИЙ НА ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

Низовцев М.И., Стерлягов А.Н.

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

При проектировании и строительстве зданий на вечномёрзлых грунтах необходимо учитывать особенности их теплового влияния на оттаивание грунта [1]. Для сохранения и поддержания фундаментов и грунтового основания зданий в многолетнем мерзлом состоянии, практикуется использование конструкций с проветриваемыми (холодными) подпольями [2].

В работе выполнено численное исследование теплового режима фундамента здания на вечномерзлых грунтах на примере одного из строящихся зданий в г. Норильске. Для определения возможности оттаивания грунта под лифтовой шахтой с использованием программного комплекса COMSOL Multiphysics 6.2 были проведены расчеты изменения температуры по глубине грунта в годовом цикле на месте строительства в естественных условиях.

В расчетах были использованы данные метеорологической станции и отчеты об инженерно-геологических изысканиях для места строительства, с помощью которых получены необходимые теплофизические характеристики грунтов. Влияние толщины снежного покрова учитывалось по результатам обобщения данных многолетних наблюдений в условиях г. Норильска [3]. Влияние солнечного излучения на нагрев поверхности грунта учитывалось с использованием данных по месячной суммарной энергии излучения. Также в расчетах учитывалась влажность различных типов грунтов, которая значительно влияла на температуру грунта из-за прямых и обратных фазовых переходов «вода-лед».

В результате расчетов были получены изменение температуры в течение года на поверхности грунта в естественных условиях и на поверхности грунта под железобетонной плитой (рис.1).

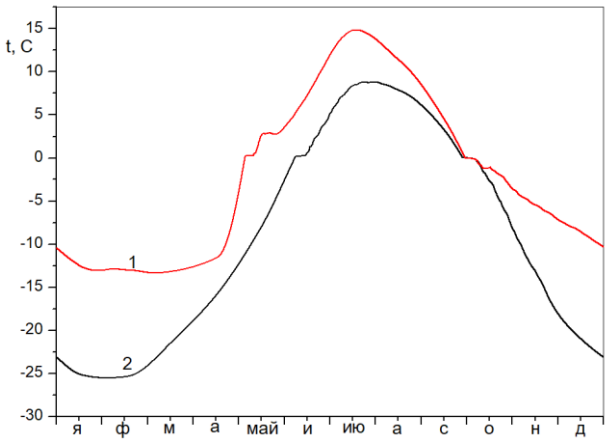


Рис. 1. Изменение температуры на наружной поверхности грунта: 1 – в естественных условиях, 2 – под железобетонной плитой.

При расчете грунта с железобетонной плитой в отличии от расчета естественного грунта не учитывался в зимнее время снежный покров, а в летнее время - нагрев поверхности за счет солнечного излучения. Согласно результатам расчетов, получено, что в летних условиях температура на поверхности грунта в естественных условиях была выше, чем под плитой, и достигала 15˚С. По распределению температуры грунта в течение года можно сделать вывод, что грунт у поверхности и под плитой проветриваемого подполья в летнее время находится в талом состоянии, а в зимнее время в замороженном.

По результатам расчетов было определено температурное поле в грунте в годовом цикле под фундаментом здания (рис. 2).

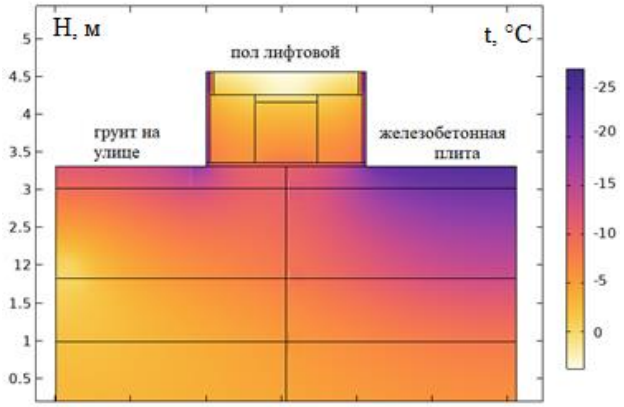


Рис.2. Распределение температуры в грунте под лифтовой шахтой на конец декабря.

С увеличением глубины грунта для всех участков наблюдалось выравнивание годовых изменений температуры с дальнейшим снижением температуры грунта в летнее время и повышением температуры в зимнее время и со сближением температур разных участков между собой. На глубине более 13 м для всех рассмотренных случаев среднегодовая температура практически не менялась и составляла -6,5˚С.

Список литературы:

1. В.Р. Мустакимов. Проектирование зданий в особых природно-климатических условиях. Учебное пособие. том. 1. Казань. 2018. 231 с.
2. СП 25.133030.2020 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах при строительстве зданий». М: Минрегионразвитие, 2020г. 117с.
3. Федотов А. А., Канибер В. В., Храпов П. В. Анализ и прогнозирование изменений температурного режима грунта в районе города Норильска // International Journal of Open Information Technologies. 2020. Т. 8. №. 10. С. 51-65

УДК 621.9

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ЗАЗОРА МЕЖДУ ПЛАСТИНАМИ МАСЛООХЛАДИТЕЛЯ НА ЕГО ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Мищенкова О.В., Чернова А.А., Шигапова А.Р.

Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова,
426069, Россия, Ижевск, ул. Студенческая, 7

Современную промышленность, не зависимо от масштаба производства, невозможно представить без машин и оборудования, работающих на жидкости. В процессе работы двигателей, машин и оборудования происходит нагрев элементов и рабочей жидкости, поэтому для бесперебойного и безотказного функционирования оборудования необходима хорошая система охлаждения.

Одним из примеров системы охлаждения двигателя и гидравлических систем является маслоохладитель. Маслоохладитель – это теплообменник, созданный специально для охлаждения масла, которое циркулирует в системе масляного снабжения гидрогенераторов, паровых турбоустановок и технологических жидкостей в системах различных гидроприводов [1], маслонапорных, трансформаторных, компрессорных установках и некоторых других системах подобного характера.

Данная работа посвящена вопросам численного исследования влияния величины зазора между пластинами маслоохладителя на его эффективность.

Рассматривается сопряженная задача теплообмена между нагретым гидравлическим маслом, пластинами маслоохладителя и холодным потоком нагнетаемого вентилятором воздуха. Жидкость (условного гидравлического масла с плотность 1100кг/м3, молярной массой 48,61кг/моль, динамическим коэффициентом вязкости 0.11Па*с и коэффициентом теплопроводности 0,41Вт/(м*К)) через коллектор сложной формы [3] подается в микроканалы [4]. Тепловой поток передается от жидкости к стенкам алюминиевого маслоохладителя [4], далее за счет теплопроводности тепло распространяется по корпусу маслоозладитлея и отводится за счет конвекции при обтекании нагнетаемым пространственным течением воздуха. Геометрическая модель единичной секции маслоохладителя (пластин) представлена в работе [2], общая схема устройства представлена в работах [3, 4].

Математическая модель движения текучих сред основана на уравнениях Навье-Стокса. Система уравнений, описывающая движение сплошных сред, в общем случае, имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{U} = 0, \\ \rho \frac{d \vec{U}}{dt} = \rho \vec{F} - \nabla p + \nabla \cdot P, \\ \rho \frac{d}{dt}\left(c_v T + \frac{U^2}{2}\right) = \rho \vec{F} \vec{U} + \nabla \cdot (P\vec{U}) + \nabla \cdot \vec{q}, \\ p = \rho R T \end{cases} \quad (1)$$

где ρ - плотность газа, p - давление, $\vec{U}$ - вектор скорости, P - тензор напряжений, F - объемная сила, T - температура, q - вектор плотности теплового потока и R - удельная газовая постоянная.

Скорость охлаждающей жидкости и ее физические характеристики указывают на ламинарный режим движения (Re=2000), поэтому модели турбулентности при расчете не использовались. Режимы движения газа согласно числам Рейнольдса ($4000 < Re < 26000$) соответствуют переходным областям, поэтому для моделирования течения газа была подключена модель турбулентности SST.

На входе в область и на верхней границе задавались скорость и температура набегающего потока (температура воздуха T=20°C, скорость воздуха V=20 м/с), давление и температура масла (температура To=60°C, давление жидкости – 1МПа); на выходе определены неотражающие граничные условия. Условия прилипания и непротекания задаются на непроницаемых твердых поверхностях. На границах масло/алюминий и алюминий/воздух использовано граничное условие IV рода. Задача решалась методом контрольных объемов. Расчетная сетка содержала более 15 млн призматических элементов.

В результате расчетов были получены распределение линий тока, температурных полей, объемное распределение температур и распределение коэффициента теплопередачи при изменении зазора между пластинами маслоохладителя от 0,0015 м до 0,0095 м с шагом 0,001 м. Показано, что величины зазора боле 0,0045м не эффективны с точки зрения теплосъёма. Проведенный анализ выявленных особенностей аэродинамики потока позволил обозначить конструктивные элементы, доработка которых позволит оптимизировать конструкцию маслоохладителя с целью повышения эффективности его работы. Показана возможность конструктивной оптимизации исполнения внешнего оребрения.

Список литературы:

1. Метизно-фланцевый завод: официальный сайт. Омск. URL: https://clck.ru/39YH9r (Дата обращения 06.03.2024).
2. А. Ю. Армянин, Е. С. Байметова, М. Е. Хвалько. Особенности теплового режима маслоохладителя с развитой внешней поверхностью Химическая физика и мезоскопия, 2022, Том 24, №1
3. Байметова Е.С. Численное моделирование гидродинамических процессов в многоканальном коллекторе // Труды МАИ. 2023. № 130.
4. Baimetova E.S., Koroleva M.R. Research of conjugate heat transfer in a collector of a complex shape of an external fins // В книге: XXI International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2022). Abstracts . Novosibirsk, 2022. С. 13-14.

УДК 533.6.011, 504.3.054, 69.032.22

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ УСЛОВИЙ ВЕТРОВОГО КОМФОРТА В РАЗЛИЧНЫХ ГОМОГЕННЫХ МОРФОТИПАХ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ

Шульженко П.Д.[1], Мешкова В.Д.[1,2], Дектерев А.А.[1,2], Литвинцев К.Ю.[2]

[1] Сибирский Федеральный Университет,
660041, Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79
[2] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Одной из проблем современных городов является неконтролируемая и хаотичная застройка территории. Для удовлетворения требований рационального природопользования расширение жилых массивов в условиях города достигается путём уплотнённого расположения зданий, а также за счёт точечного высотного строительства. Городская застройка способствует изменению естественного аэрационного режима, что приводит к ухудшению процессов самоочищения атмосферы от загрязняющих веществ. Формируемые условия в застройке негативно сказываются на биоклиматическом уровне комфортности населения [1-2]. В связи с этим, возникает необходимость в исследовании формирования ветрового режима в различных морфотипах городской среды для выявления оптимальных видов застроек с точки зрения ветрового уровня комфорта.

Аэрационный режим считается комфортным, если скорости ветра находятся в диапазоне от 1 до 5 м/с. Наиболее комфортный режим лежит в диапазоне от 1 до 3 м/с, а близкий к комфортному – от 3 до 5 м/с [3].

Здания, формирующие микрорайоны, можно разделить на характерные виды. Микрорайоны, образованные из гомогенных или гетерогенных видов застройки, называются морфотипами [4]. На рисунке 1 представлены основные геометрические виды зданий, на основе которых в дальнейшем были сформированы гомогенные морфотипы микрорайонов.

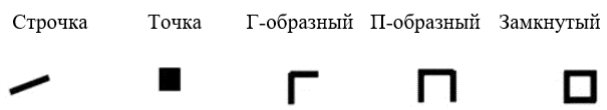


Рис. 1. Геометрические виды зданий

На основе вышеперечисленных факторов, цель исследования заключалась в изучении формирования аэрационного режима в результате обтекания городской застройки разных гомогенных морфотипов.

Численное моделирование осуществлялось с использованием программного комплекса SigmaFlow [5]. Исследование проводилось с помощью метода вычислительной гидродинамики. В расчете использовалась микромасштабная численная модель атмосферы городской среды, основанная на нестационарных осреднениях по Рейнольдсу уравнениях Навье-Стокса для несжимаемых течений с переменной плотностью, которая включает в себя уравнения неразрывности, движения и сохранения энергии. В качестве базовой модели турбулентности используется двухпараметрическая модель k-ω SST [6]. Скорость набегающего потока была равна 2,5 м/с.

На рисунке 2 представлены все виды микрорайонов, использованные в исследовании.

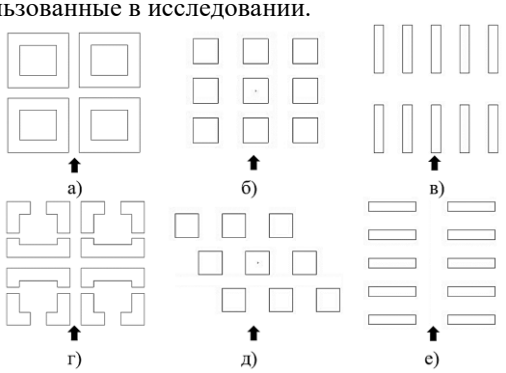


Рис. 2. Варианты морфотипов расчетных моделей микрорайонов: а) Периметральный закрытый; б) Точечный; в) Строчный (Вариант 1); г) Периметральный открытый; д) Точечный (шахматный); е) Строчный (Вариант 2)
Примечание – обозначает направление ветра.

Полученные результаты исследования показали, что наиболее оптимальные микрорайоны для проживания человека являются микрорайоны периметрального и строчного морфотипа. Скорости ветра в данных микрорайонах варьируется в диапазонах от 0 до 2 м/с, а формирующиеся внутри симметричные вихревые структуры способствуют активному вентилированию пространства. Наиболее неблагоприятным районом стал строчный морфотип. Скорости ветра непосредственно внутри микрорайона находятся в диапазоне от 0 до 6 м/с, также наблюдаются зоны с повышенным уровнем пульсации скорости, что приводит к постоянной смене направления и скорости ветра.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-61-00098, https://rscf.ru/project/22-61-00098/

Список литературы:

1. Ландсбер, Г.Е. Климат города / Ландсберг, Г.Е. // Гидрометеоиздат. – 1983. – С. 248
2. Мягков М.С. Особенности ветрового режима типовых форм городской застройки / Мягков М.С., Алексеева Л.И. // AMIT 1. – 2014. – С. 29.
3. Хомич В.А. Экология городской среды: учебное пособие / Хомич В.А. – Москва, 2006. – 240 с.
4. Oliveira V., Urban Morphology / Oliveira V. // Springer International Publishing Switzerland. – 2016. – 192 p.
5. Filimonov S. A. Analysis of vortex structures formed in the winter in the at-mosphere of Krasnoyarsk city / Filimonov S. A., Meshkova V. D., Dekterev A.A. and et al. // Journal of Physics: Conference Series. – 2021 – 2088 – 1 – P 1-8.
6. F.R. Menter. Zonal two equation k-ω turbulence models for aerodynamic flows // AIAA Paper. 1993. No. №93-2906. P. 21.

Секция 11 Прикладное и машинное обучение в теплофизике и энергетике

УДК 666.94, 004.89

О ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕЧИ ОБЖИГА ЦЕМЕНТНОГО КЛИНКЕРА С ПОМОЩЬЮ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Абдуракипов С.С.[1], Бутаков Е.Б.[1]
[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Качественные и стоимостные показатели цементного клинкера во многом зависят от характеристик работы оборудования, в частности, от продолжительности технологического процесса клинкерной печи. В настоящее время оператор печи управляет оборудованием, основываясь на заданных параметрах процесса и личном опыте. В результате оператор концентрируется на работе оборудования и не может полностью контролировать его энергопотребление. Поскольку затраты на электроэнергию составляют значительную часть общих производственных затрат, крайне важно повысить энергоэффективность, чтобы получить дополнительное конкурентное преимущество [1].

Целью работы было на основании данных АСУТП, лаборатории по входному сырью и питанию печи, а также исторических значений качества клинкера разработать цифрового помощника оператора на основе модели машинного обучения, который позволит повысить энергоэффективность, не ухудшая качество готовой продукции (клинкера). Для этого были решены следующие задачи: 1) разработана модель прогнозирования будущего качества клинкера на 2 часа вперед, 2) выявлены зоны возможной оптимизации энергоэффективности, 3) разработаны рекомендации по управлению печью.

Собран набор данных: 86 параметров и 530 тыс. записей наблюдений. Из них: 29 – данные MES системы, 22 - данные о химии клинкера, 17 - данные о питании, 18 - данные о сырье. Дополнительно использовались ограничения по уставкам, выявленные на основании собранной информации от технологов. Разработана модель классификации размеченных эффективных режимов на основе алгоритма градиентного бустинга над деревьями решений и произведен анализ значимости признаков с использованием значений Шепли. Проведено сравнение классических моделей с дополнительными признаками и нейросетевых моделей. Показано, что модели трансформеров с вниманием не позволили получить достоверный повторяемый результат на тестовой выборке из-за качества данных.

Показано, что только 10% наблюдений соответствует “идеальным” параметрам качества клинкера (содержание алита 62-68%, свободного CaO 1,9-2,1%). На основе анализа качества клинкера, показано, что основная проблема заключается в содержании минерала алита. Всего в 14,4% случаев содержание алита в клинкере превосходит значение 62%. В 27% случаев содержание свободного CaO в клинкере превосходит значение 2,1%. В работе определены целевые режимы работы печи. Производилось моделирование комплексного целевого показателя качество/энергоэффективность, позволяющего определить целевые режимы работы печи. При активном управлении оператор активно управляет печью для удержания её работоспособности и производительности. В стабильном режиме оператор может управлять энергоэффективностью. Анализ режимов работы печи выявил большой потенциал оптимизации. Установлено, что увеличение «зеленой» зоны (стабильный режим) за счет «красной» (активное управление) на 20% принесет дополнительно: 48 дней – увеличение периода стабильной работы, 39700 тонн – увеличение производства клинкера, 42686 тонн – увеличение производства цемента, более 1 млн. м^3 – экономия газа (при снижении расхода на экономии 2 м^3 на тонну сырья).

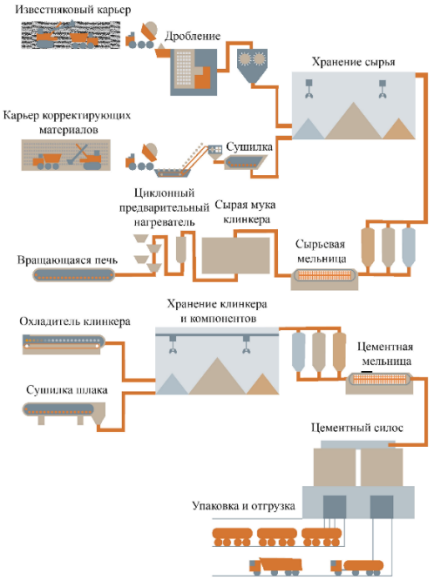


Рис. 1. Схема производства цементного клинкера.

Показано, что стабильность питания печи позволяет улучшить качество готовой продукции. Высокая вариация питателя печи вызывает активное управление подачей газа. Высокая вариация питания приводит к увеличению дисперсии всей установки и попыткам удержать ее в стабильном состоянии за счет изменения объема сжигаемого газа. При стабильной работе питателя печи оператор успешно удерживает качество при разных параметрах сырья. При высокой вариации работы питателя печи большое влияние на результат оказывает коэффициент насыщения известью (LSF). Полученные результаты могут быть использованы для помощи оператору в работе.

Список литературы:

1. Chatterjee, A. K. (2018). Cement production technology: Principles and practice. CRC Press.

УДК 621.771; 004.89

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ДРОССА ПРИ ГОРЯЧЕМ ЦИНКОВАНИИ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА С ПОМОЩЬЮ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Абдуракипов С.С.[1], Бутаков Е.Б.[1]
[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Оцинкованный листовой прокат является основным видом продукции агрегатов непрерывного горячего цинкования (АНГЦ). Горячее цинкование металла является наиболее распространенным методом защиты листа, которое дает возможность значительно улучшить его эксплуатационные свойства. Горячее цинкование холоднокатаной стали состоит в погружении очищенного от масел, окислов и окалины стального листа в печь с цинковым расплавом. Процессы горячего покрытия листовой стали сопровождаются образованием побочного продукта - дросса, представляющего собой соединения цветных металлов с железом, которые загрязняют рабочий расплав и полосу, уменьшают рабочий объем ванны, поэтому требуется их периодическое удаление [1]. Основные технологические узлы линии непрерывного горячего цинкования представлены на рис. 1. Целью работы было 1) исследование возникновения дефектов покрытия ленты из-за дросса в процессе горячего цинкования с применением машинного обучения, 2) создание рабочего стола инженера на базе статистической модели, позволяющей сократить появление дефектов рулона посредством управления ключевыми параметрами технологического процесса, 3) определить факторы, влияющие на возникновение дросса.

Предложенная задача была решена в виде многоклассовой классификации для определения возможного количества дросса на 1 м^2 проката листа. В процессе моделирования использовались данные с датчиков производства за четыре месяца, которые содержали более десяти различных параметров, отражающих состояние процесса оцинковки. В анализе были использованы данные: толщина металла, толщина цинка сверху, толщина цинка снизу, скорость прокатки рулона, температура в носке печи, температура в ванне оцинкования, позиция воздушного ножа, усилие в дрессировочной клети, удлинение в дрессировочной клети, смена производства, бригада производства.

Данные были предоставлены по определенной интересующей толщине металла – 0,65 мм. В наборе данных было 134 материнских рулона и 212 дочерних, было получено 430 тысяч строк с различными значениями параметров для каждого метра рулона. Из них фактов дроссов – 4181 (меньше 1%). На коммерческих листах дросс фиксируется всегда из-за особенности покрытия тонкого металла, поэтому в итоговой выборке рассматриваются только автолисты.

Между параметрами рулона стали и количеством дросса есть прямая зависимость – чем больше площадь стали, тем больше вероятность появления дефекта. В связи с этим был выбрана целевая переменная – количество дефектов, скорректированное на площадь рулона (плотность дефектов). Разработана модель классификации на 4 группы: в секторе рулона нет дефектов (48,3%), удельное число дефектов < 1 (28,2%), удельное число дефектов 1-1,75 (15,7%), удельное число дефектов > 1,75 (7,8%).

В результате было показано, что наиболее важными параметрами, которые необходимо контролировать при прокате являются скорость прокатки листа, удлинение дрессировочной клети, температура в ванне цинкования, температура в носке печи. Реализован алгоритм автоматической оценки рулонов стали на основе ансамбля моделей градиентного бустинга. Результаты были представлены в виде аналитической панели, которые позволяют наглядно визуализировать и интерпретировать конкретные ситуации возникновения дефектов. Для оценки рулона был разработан цифровой помощник, позволяющий симулировать процесс управления процессом принятия решений с целью выяснить, какие признаки и как повлияют на возникновение дросса в конкретный момент времени для данного рулона. Модели могут применяться в режиме реального времени для осуществления оценки рулонов стали, а также дообучаться при поступлении новых данных, содержащих новые возможные случаи и закономерности между параметрами, влияющие на возникновение дефектов. Разработанные модели могут быть использованы в различных этапах процесса выпуска стали: автоматизации сертификации продукции, прогнозирования дефектов во время производства и интерпретация причин возникновения дефектов.

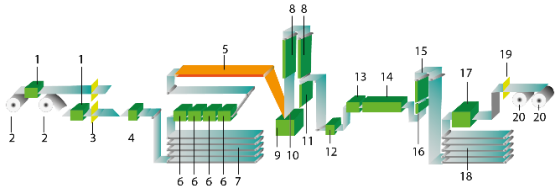


Рис. 1. Основные технологические узлы линии непрерывного горячего оцинкования. 1 – правильные машины, 2 – размыватели, 3 – гильотинные ножницы, 4 – сварочная машина, 5 – печь отжига, 6 – секции очистки, 7 – входное петлевое устройство, 8 - секции принудительного воздушного охлаждения, 9 – ванна оцинкования, 10 – газовый нож, 11 – ванна водяного охлаждения, 12 – устройство для измерения толщины цинкового покрытия, 13-дрессировочная клеть, 14 - правильно-растяжная машина, 15 – печь сушки, 16 - химкоутер, 17 – кромкообрезные ножницы, моталки, 18 – выходное петлевое устройство, 19 – гильотинные ножи, 20 – моталки.

Список литературы:

1. Рябчиков М. Ю., Рябчикова Е. С., Новак В. С., Клименко А. Е. Изучение ограничений производительности агрегатов непрерывного горячего оцинкования, связанных с дефектами продукции // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. 2024. Т. 67. № 1. С. 89-105.

УДК 532.517

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПОТОКА В КАНАЛЕ

Бернар А.[1], Ли Х.[1,2], Яковенко С.Н.[1,2]

[1] Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1
[2] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Алгоритмы машинного обучения (ML) последнее время активно применяются для улучшения моделей осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса (RANS), в частности, аппроксимаций турбулентных потоков тепла и массы, анизотропии напряжений Рейнольдса (RSA), в том числе, в задачах энергетики [1].

В работе сопоставлены различные ML-методы для определения RSA-тензора, в частности: нейронная сеть с тензорным базисом (TBNN) [2], случайный лес с тензорным базисом (TBRF) [3], многомерное программирование экспрессии генов (MGEP) [1, 4]. Обсуждается выбор входных признаков, тензоров в базисе [1-4]. Расчеты по разным RANS-моделям выполнены с помощью OpenFOAM. Изучены способы подстановки RSA-тензора в RANS-решатель.

Рассматриваются канонические течения в канале с выступом (BUMP) [5] и квадратном канале (SD) [6] с различными параметрами: длина выступа 305 мм, высота выступа 20 мм ≤ H ≤ 42 мм для случаев BUMP; число Рейнольдса 1100 ≤ Re ≤ 3500 для случаев SD.

Нормальные компоненты нормализованного RSA-тензора $a_{ij} = 2kb_{ij} = \tau_{ij} - (2/3)k\delta_{ij}$, обученные для случаев BUMP при $H = 26$ мм и 31 мм, затем тестируемые при $H = 38$ мм, иллюстрируют (рис. 1), как TBRF-алгоритм улучшает предсказание b_{ij}. Значения a_{ij} далее подставляются в решатель для вычисления компонент вектора средней скорости. Перед подстановкой выполняется сглаживание с применением гауссового фильтра и проверяется соблюдение условий реализуемости.

Подстановка RSA из традиционной линейной модели BM (т.е. линейной модели вихревой вязкости) дает значительное отклонение для продольной компоненты средней скорости и некорректное (нулевое) воспроизведение вторичного потока в сечении SD, тогда как квадратичная аппроксимация MGEP [4], основанная на данных, улучшает предсказание (рис. 2).

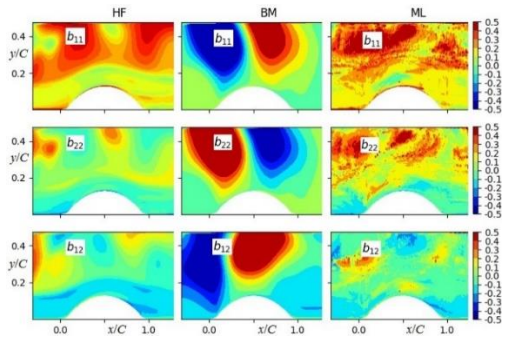


Рис. 1. Компоненты b_{11}, b_{22}, b_{12} тензора анизотропии напряжений Рейнольдса: данные высокой точности (HF) [5], модели Буссинеска (BM) и машинного обучения (ML).

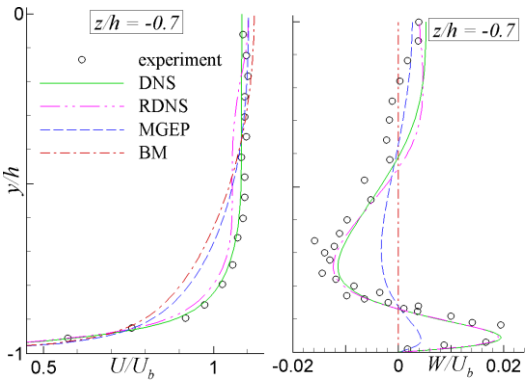


Рис. 2. Профили компонент средней скорости в поперечном сечении SD-течения, $z = -0.7h$, $Re = U_b h/\nu = 3500$, U_b – среднерасходная скорость, h – полуширина канала: DNS и измерения [6], RDNS (настоящая работа), MGEP и BM [4].

Подход RANS-DNS (RDNS), где уравнения включают «замороженные» значения a_{ij} из данных DNS [6] улучшает воспроизведение по сравнению с MGEP и BM. Это подразумевает дальнейшее уточнение RSA-модели с помощью алгоритмов ML (таких как TBNN, TBRF, их расширений), если ML-распределения RSA оказываются достаточно близки к целевым значениям высокоточных данных DNS, LES или измерений.

Далее, ML-методы и улучшенные с их помощью RANS-модели применяются к другим течениям в каналах сложной геометрии и для уточнения турбулентного потока скаляра в задачах с тепломассопереносом.

Работа включает результаты диссертаций магистранта НГУ (Ли Х.), аспиранта НГУ (Бернар А.) и поддержана РНФ (проект 22-19-00587).

Список литературы:

1. Li H., Yakovenko S.N., Ivashchenko V., Lukyanov A., Mullyadzhanov R., Tokarev M. Data-driven turbulence modeling for fluid flow and heat transfer in peripheral subchannels of a rod bundle // Phys. Fluids. 2024. Vol. 36. 025141. P. 1-19.
2. Ling J., Kurzawski A., Templeton J. Reynolds averaged turbulence modelling using deep neural networks with embedded invariance // J. Fluid Mech. 2016. Vol. 807. P. 155-166.
3. Bernard A., Yakovenko S.N. Enhancement of RANS models by means of the tensor basis random forest for turbulent flows in two-dimensional channels with bumps // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 2023. Vol. 64, No. 3. P. 437-441.
4. Li H., Yakovenko S.N. Application of machine learning methods to develop algebraic Reynolds-stress models for flows in channels // Turbulence, Heat and Mass Transfer 10 / Eds. K. Hanjalić et al. – Begell House Inc., 2023. P. 345-348.
5. Matai R., Durbin P. Large-eddy simulation of turbulent flow over a parametric set of bumps // J. Fluid Mech. 2019. Vol. 866. P.503-525.
6. Pinelli A., Uhlmann M., Sekimoto A., Kawahara G. Reynolds number dependence of mean flow structure in square duct turbulence // J. Fluid Mech. 2010. Vol. 655. P. 107-122.

УДК 621.9

ФИЗИЧЕСКИ ИНФОРМИРОВАННЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ: ПОДХОДЫ И ПРИЛОЖЕНИЯ

М.А. Братенков [1], Д.И. Сахаров [1], В.А. Травников [1], А.В. Серёдкин [1, 2], В.А. Калинин [1], Р. И. Мулладжанов [1, 2].

[1]*Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*
[2]*Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск, Россия*

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие, активное развитие методов глубокого обучения приводит к появлению новых инструментов в науке и инженерии, включая моделирование сложных физических систем. Нейронные сети уже давно рассматриваются как альтернативный подход к решению уравнений в частных производных (УЧП). Одним из подходов являются физически-информированные нейронные сети (PINN) [1]. Ключевыми преимуществами PINN, по сравнению с традиционными численными решателями, являются: возможность работы без построения сложных нерегулярных/регулярных расчетных сеток; устойчивость к шуму и ошибкам в экспериментальных данных; простое внедрение экспериментальных данных.

Более того, использование численных методов для расчета сложных задач, например, связанных с характеристиками турбулентных потоков, может приводить к нехватке вычислительных ресурсов в случае экстремальных параметров течения или необходимости параметрического исследования. Вместе с тем, подходы, основанные на PINN, могут быть потенциально эффективны как самостоятельные решатели, так и в рамках гибридных методов, объединяющих нейронные сети и классические подходы.

В настоящее время активные исследования в области PINN сфокусированы на изучении способов управления параметрами нейронной сети и процессом обучения с целью значительного улучшения точности прогнозов. Это направление исследований крайне важно, поскольку часто достигаемая точность оказывается недостаточной для надежного применения в реальных ситуациях. Работы в этой области нацелены на выявление оптимальных стратегий настройки и обучения нейронных сетей, чтобы максимизировать их предсказательную способность и обеспечить их пригодность для решения сложных задач в различных областях науки и инженерии.

В данном исследовании акцент сделан на оценке эффективности различных модификаций PINN и их комбинаций на примере нескольких модельных задач, включая двумерную стационарную задачу Навье-Стокса с препятствием и одномерную задачу конвекции [2]. Особое внимание уделяется понимаю механизмов влияния методов на стабилизацию процесса обучения нейросети и улучшение качества конечной аппроксимации. Результаты исследования демонстрируют: влияние адаптивных и статических алгоритмов сэмплирования точек на качество итогового решения; возможность варьирования параметра задачи – предлагается подход, при котором в процессе обучения модель аппроксимирует сразу множество решений физической задачи, например, при различном числе Рейнольдса в уравнении Навье-Стокса; как постепенное усложнение задачи или плавный переход к плохой обусловленности позволяет PINN лучше «понять» физику, что способствует улучшению обобщающей способности и качества модели.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 19-79-30075-П. Вычислительные ресурсы предоставлены в рамках госзадания Института теплофизики СО РАН (FWNS-2022-0009).

Список литературы:

1. M. Raissi, P. Perdikaris, G.E. Karniadakis, Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations, Journal of Computational Physics, Volume 378, 2019, Pages 686-707, ISSN 0021-9991.
2. Krishnapriyan, A., Gholami, A., Zhe, S., Kirby, R., Mahoney, M. W. Characterizing possible failure modes in physics-informed neural networks, Advances in Neural Information Processing Systems 34, 2021, (pp. 26548–26560).

УДК 004.8

ОДНОЭТАПНАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ КРОВОТОКА АНЕВРИЗМ БРЮШНОЙ АОРТЫ С ПОМОЩЬЮ ГИБРИДНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Епифанов Р.Ю.[1], Карпенко А.А. [1], Мулляджанов Р.И.[1, 2]

[1] Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1
[2] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Существующие алгоритмы извлечения поверхности кровотока для гемомоделирования аневризм брюшной аорты (АБА) в основном извлекают не напрямую из КТ, а через этап сегментации [1]. Недостатком такого подхода прежде всего является то, что обучение нейронной сети сегментации игнорирует односвязность области кровотока, что в случае даже небольших ошибок сегментации будет требовать применение шагов пост обработки. Кроме того, даже если сегментация не потребует применения шагов постобрабтки, то поверхность извлеченная с помощью марширующих кубов является слишком грубой и будет требовать применения алгоритмов сглаживания перед гемомоделированием. Чтобы решить эти проблемы для одноэтапной генерации сетки, был предложен первым метод Voxel2Mesh [2]. Voxel2Mesh хорошо выделяет относительно простые формы, но для более сложных геометрий в литературе были предложены модификации [3, 4]. Таким образом, целью данной работы является разработка одноэтапного алгоритма для выделения поверхности просвета АБА.

В данной работе было проведено глубокое переосмысление классической архитектуры Voxel2Mesh, в том числе были модернизированы воксельный кодер и поверхностный декодер согласно современным представлениям об эффективных архитектурах. Также были предложены улучшения процесса обучения гибридных сетей, подобных архитектур, которые улучшают скорость и повышают робастность обучения. Предложенная архитектура была протестирована на наборе из 90 КТ, разделенном в соотношении 40-20-30 для обучения, валидации и тестирования, соответственно. Для эффективного увеличения размера обучающей выборки в процессе обучения к тренировочной части применялись агрессивные аугментации. В итоге удалось добиться качество генерации поверхности сопоставимое с качеством на задаче сегментации.

Работа выполнена при поддержке Математического Центра в Академгородке, соглашение с Министерством науки и высшего образования Российской Федерации №075-15-2022-282.

Список литературы:

1. Brutti F. et al. Deep learning to automatically segment and analyze abdominal aortic aneurysm from computed tomography angiography //Cardiovascular Engineering and Technology. – 2022. – С. 1-13.
2. Wickramasinghe U. et al. Voxel2mesh: 3d mesh model generation from volumetric data //Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention–MICCAI 2020: 23rd International Conference, Lima, Peru, October 4–8, 2020, Proceedings, Part IV 23. – Springer International Publishing, 2020. – С. 299-308.
3. Kong F., Wilson N., Shadden S. A deep-learning approach for direct whole-heart mesh reconstruction //Medical image analysis. – 2021. – Т. 74. – С. 102222.
4. Bongratz F. et al. Vox2cortex: fast explicit reconstruction of cortical surfaces from 3D MRI scans with geometric deep neural networks //Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2022. – С. 20773-20783.

УДК 004.8

СУРРОГАТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ ПОМОЩИ ГРАФОВЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Травников В.А.[2], Плохих И.А.[2] , Мулляджанов Р.И.[1]
[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

В начальной фазе разработки технологических продуктов, например, компонентов газотурбинных двигателей, критически важно провести обширное тестирование гипотез для повышения эффективности и производительности. Существующие системы могут обеспечить высокую точность расчетов, но страдают от значительной вычислительной сложности.

Сейчас суррогатное моделирование становится все более популярным методом, где сложные системы, требующие больших вычислительных мощностей для моделирования, заменяются более простыми в вычислительном плане моделями. Особенно востребованы нейронные сети [1].

В данном исследовании мы рассматриваем суррогатное моделирование с использованием графовых нейронных сетей для анализа обтекания тела в потоке. Графовые нейронные сети применяются для решения задачи регрессии на расчетной сетке. На вход поступает нерегулярная расчетная сетка, представленная в виде графа, а на выходе получаем решение в узлах сетки. Таким образом, суррогатная модель приближает численное решение для анализа обтекания объектов, форма которых может меняться.

Существует несколько подходов к обучению суррогатной модели, таких как: обучение на основе данных о решениях[2], обучение с использованием информации о физической системе[3], а также смешанные подходы. Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки, которые существенно влияют на эффективность модели. Поэтому наша работа посвящена исследованию и сравнению различных подходов к обучению графовой суррогатной модели, а также определению наиболее оптимальных стратегий.

Список литературы:

1. Ribeiro M. D. et al. DeepCFD: Efficient steady-state laminar flow approximation with deep convolutional neural networks //arXiv preprint arXiv:2004.08826. – 2020.

2. Chen J., Hachem E., Viquerat J. Graph neural networks for laminar flow prediction around random two-dimensional shapes //Physics of Fluids. – 2021. – Т. 33. – №. 12.

3. Lu L. et al. DeepXDE: A deep learning library for solving differential equations //SIAM review. – 2021. – Т. 63. – №. 1. – С. 208-228.

Секция 12 Материаловедение в задачах теплофизики и энергетики

УДК 539.196.3

ИЗМЕНЕНИЕ ПРОВОДИМОСТИ ГРАФЕНА ПРИ ВЫСЫХАНИИ ВОДНЫХ КАПЕЛЬ НА ЕГО ПОВЕРХНОСТИ

Андрющенко В.А. [1,2], **Бетке И.А.**[1], **Богомолова А.И.**[1,2]
[1] Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1
[2] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Графен представляет собой двумерный лист атомов углерода в гексагональной решетке. Интерес, проявляемый к изучению графена, связан с его необычными физическими свойствами, такими как высокая подвижность зарядов, максимальное отношение площади поверхности к объёму и др. [1]. Взаимодействие одиночных молекул различных веществ с графеном и их влияние на его электрические свойства, может быть полезно при разработке различных сенсорных приложений графена. Данное обстоятельство активно обсуждается различными коллективами [2-3]. В недавних работах было показано, что графен изменяет свои проводящие характеристики при погружении в воду [4], а также является чувствительным к движению водного потока [5]. Наличие чувствительности графена к коллективному взаимодействию молекул воды с его поверхностью может быть использовано для создания и различных сенсоров и расширения области их применимости.

В данной работе проверяется наличие зависимости проводимости графенового покрытия к динамике высыхающих на его поверхности водных капель. При этом основной целью проводимых экспериментов является установление наличия зависимостей между контактным углом, высотой и площадью контакта с поверхностью, высыхающей капли, и сопротивлением графенового чипа на непроводящей подложке. В работе используется графен, синтезированный на медной фольге методом CVD при атмосферном давлении и перенесенный на непроводящие подложки SiO_2 через водную среду. Ранее было показано, что данный метод переноса обладает высокой воспроизводимостью и позволяет обеспечить высокое качество переносимого на подложку графена [6]. В экспериментах использовались подложки SiO_2 с разными шероховатостями. Размер водных капель варьировался от 2 до 20 микролитров. Площадь графенового покрытия составляла примерно 1.5 $см^2$. Для установления проводящих свойств на края графенового покрытия напылялись медные электроды. Напыление осуществлялось с помощью магнетрона.

В результате проведения экспериментов был установлен различный характер высыхания капель на подложках с различной шероховатостью. На более шероховатых образцах капли постепенно увеличивала радиус кривизны при почти неизменной площади контакта. При этом резкий срыв контактной линии происходил на финальном участке высыхания капель. Для более гладких образцов наблюдалось непрерывное движение контактной линии при почти постоянном контактном угле. Во всех случаях наблюдалось изменение сопротивления графенового чипа. Общее изменение сопротивления при высыхании капель составляло от нескольких процентов до нескольких десятков процентов в зависимости от образцов и размеров капель. Были установлены зависимости сопротивления капель, как от площади контакта капель с образцами, так и от высоты капель при неизменной площади контакта с образцами, что указывает на некоторую чувствительность системы к процессам происходящим во всем объеме водных капель. Полученные результаты будет полезны при развитии сенсорных приложений графена и создании соответствующих датчиков.

Список литературы:

1. Mbayachi V. B. et al. Graphene synthesis, characterization and its applications: A review //Results in Chemistry. 2021. Т. 3. С. 100163.
2. Melios C. et al. Water on graphene: review of recent progress //2D Materials. 2018. Т. 5. №. 2. С. 022001
3. Bagheri M. H. et al. Adsorption transparency of supported graphene //Carbon. 2019. Т. 155. С. 580-586.
4. Andryushchenko V. et al. Graphene-polymer composite conductivity in air and water //Applied Surface Science. 2021. Т. 567. С. 150843.
5. Sorokin D. V. et al. Water motion near graphene and its electric conductivity //Thermophysics and Aeromechanics. 2022. Т. 29. №. 6. С. 899-904.
6. Andryushchenko V. A. et al. Control of graphene adhesion to substrate during transfer through liquid //Journal of Molecular Liquids. 2024. Т. 395. С. 123827.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-29-00260).

УДК 621.9

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ЗАТРАВОЧНОГО СЛОЯ АМОРФНОГО ГЕРМАНИЯ НА ЗОЛОТО-ИНДУЦИРОВАННУЮ КРИСТАЛЛИЗАЦИЮ

Баранов Е.А.[1], Замчий А.О.[1], Константинов В.О.[1], Самохвалов Ф.А.[1,2], Родионов А.А.[1], Старинская Е.М.[1]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

В настоящее время одним из наиболее перспективных и широко исследуемых способов получения тонких пленок поликристаллического (poly-Ge) с увеличенным размером кристаллита при более низких температурах процесса, позволяющих использовать низкотемпературные подложки (пластик, стекло), является метод золото-индуцированной кристаллизации (ЗИК). В данной работе, было проведено исследование процесса золото-индуцированной кристаллизации пленок аморфного германия с различной толщиной затравочного слоя аморфного германия в зависимости от температуры и времени отжига.

На подложки из кварца были нанесены затравочные слои аморфного германия различной толщины (4 нм, 7 нм и 10 нм) с использованием магнетронного распыления. Осаждение пленок аморфного германия осуществлялось в режиме HiPIMS при комнатной температуре. Толщина затравочного слоя аморфного германия на подложке измерялась с использованием метода спектральной и лазерной эллипсометрии. Далее на образцы были осаждены тонкие слои золота толщиной 80 нм с использованием метода термовакуумного напыления. Затем на приготовленные образцы была нанесена ультратонкая пленка из аморфного германия толщиной 2 нм с использованием метода магнетронного распыления. По завершении процесса осаждения образцы выдерживались на воздухе в течение нескольких часов для окисления тонкого слоя аморфного германия и образования мембранного слоя субоксида германия (GeO_x) на поверхности золота. Этот слой служит диффузионным барьером, и его толщина контролирует взаимодиффузию германия и золота. Далее был осажден слой аморфного германия толщиной 95 нм с использованием магнетронного распыления. В результате исходные слоистые образцы имели структуру "подложка/a-Ge/Au/GeOx/a-Ge".

Полученные образцы были подвергнуты высоковакуумному отжигу при давлении около 10^{-5} Па и температурах от 220 до 300 °C в течение 20-60 часов.

Измерения толщины затравочного слоя аморфного германия проводились с использованием метода эллипсометрии на подложках из кварца. Исследование проводилось на образце с предполагаемой толщиной слоя, равной 7 нм. Диаметр светового луча на спектроэллипсометре составлял около 3 мм. Для анализа спектров использовалась оптическая модель: подложка из кварца SiO2 с нанесенным на нее слоем аморфного германия с пониженной плотностью. В результате расчетов была получена толщина слоя в 7.7 нм, состоящего на 85% из аморфного германия и на 15% из пор. Это дало значения коэффициента поглощения k=1.44 и коэффициента преломления n=4.383 для длины волны света 632 нм. Те же параметры k и n использовались для моделирования измерений на лазерном сканирующем эллипсометре. Диаметр светового луча на поверхности образца для лазерного сканирующего эллипсометра составлял 20 мкм. Измеренная толщина слоя на сканирующем эллипсометре была достаточно однородной и составляла примерно 8 нм.

Дифракционные картины образцов, полученные после отжига при температуре 300 °C и 260 °C, подтвердили образование кристаллического германия, с помощью наличия рефлекса с центром на 27.3°, соответствующего плоскости (111) в кристаллической решетке германия, а также рефлексами на 45.4°, 53.8° и 66.1°, соответствующими плоскостям (220), (311) и (400). На дифракционной карте также присутствуют рефлексы, соответствующие кристаллическому золоту. Из анализа рентгеновских дифракционных спектров было произведено определение области когерентного рассеяния, размер которой, предполагается, соответствует диаметру кристаллита германия. Размер кристаллитов был рассчитан с использованием формулы Шеррера на основе индивидуальных дифракционных максимумов с учетом приборного уширения пиков.

Спектры комбинационного рассеяния света были получены со стороны подложки после термического отжига при температуре 260 °C образцов с затравочным слоем толщиной 4 нм и 10 нм. На спектрах для каждой толщины затравочного слоя наблюдается наличие узких пиков при волновом числе около 300 $см^{-1}$ с шириной на полувысоте около 5 $см^{-1}$, что указывает на присутствие поликристаллического германия.

В результате исследований было обнаружено, что в процессе золото-индуцированной кристаллизации аморфного германия образуется поликристаллический германий с предпочтительной кристаллографической ориентацией (111). Этот процесс сопровождается обменом слоями. Образцы с более тонким затравочным слоем обладают более высокой плотностью образования зародышей. Более того, средний размер кристаллита увеличивается при увеличении толщины затравочного слоя и температуры отжига.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10079, https://rscf.ru/project/22-79-10079/ (синтез и отжиг тонких пленок) и в рамках государственного задания Института Теплофизики СО РАН № АААА-А19-119061490008-3 (метод спектральной эллипсометрии для диагностики образцов).

УДК 539.233

ГАЗОВЫЙ СЕНСОР НА ОСНОВЕ CVD-ГРАФЕНА

Богомолова А.И.[1,2], Смовж Д.В.[1,2], Баннов А.Г.[3]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1
[3] Новосибирский государственный технический университет,
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Графен - это двумерный материал, состоящий из моноатомного слоя углерода. Графен обладает уникальными свойствами, такими как высокая электропроводность, механическая прочность и большая удельная поверхность. Благодаря этим свойствам графен является превосходным материалом для создания чувствительных и высокоэффективных газовых датчиков. Графеновые газовые датчики обладают высокой чувствительностью, селективностью и быстрым временем реагирования на изменение концентрации газов в окружающей среде. Такие датчики имеют широкий спектр потенциальных применений в различных областях, включая медицину, промышленность, экологию и безопасность, например, для обнаружения токсичных и загрязняющих веществ. В этой работе мы представляем способ улучшения газочувствительности графена, основанный на модификации поверхности графена наночастицами олова методом магнетронного распыления. Благодаря своим уникальным электронным свойствам, функционализированные графеновые газовые датчики также обладают потенциалом для создания портативных и миниатюрных устройств, которые могут быть интегрированы в различные устройства микроэлектроники и электромеханические системы для мониторинга окружающей среды.

Целью настоящего исследования является изучение сенсорных свойств ХОГФ графена и их зависимости от структуры графенового покрытия. Синтез графена производился методом химического парофазного осаждения из метана на медной подложке. В качестве подложек, на которые осуществлялся перенос, были использованы пластины монокристаллического кремния и полиэтилентерефталат/этиленвинилацетат (ПЭТ/ЭВА). Сенсорные свойства полученных датчиков исследовались на специализированной газовой установке [1]. В состав установки входят газопроводы для анализируемых газов: диоксида азота и газа-носителя синтетического воздуха. Скорость потока газовой смеси, подаваемой в измерительную ячейку для контакта с газовыми датчиками, составляла 200 мл/мин. Поток газа-аналита меняли таким образом, чтобы полученная смесь имела определенную концентрацию газа (25–100 ppm). Измерения проводили по следующей методике: на первом шаге измеряли базовую линию, при этом газ-носитель подавался в течение 50 минут. Затем для каждой концентрации сенсор экспонировали газом-аналитом в течение 10 мин с последующей 10-минутной продувкой газом-носителем для отчистки сенсора и восстановления системы. Сенсорные свойства газовых датчиков исследовались при комнатной температуре (25±3 ºC). Данные измерений были импортированы в Origin® 2018b (OriginLab Corporation) и обработаны далее для компенсации отклонения базовой линии.

Показано, что максимальной чувствительностью функционализированные оловом графеновые чипы обладают к содержанию в атмосфере диоксида азота, при этом отклик R/R_0 составляет 5,2% при концентрации газа-аналита 25 ppm. В то же время за 10 минут датчик восстанавливается на 62% (см. рис. 1). Таким образом, предложенный в работе способ позволяет создавать графеновые сенсоры, для повышения чувствительности и селективности которых можно использовать функционализацию наночастицами олова.

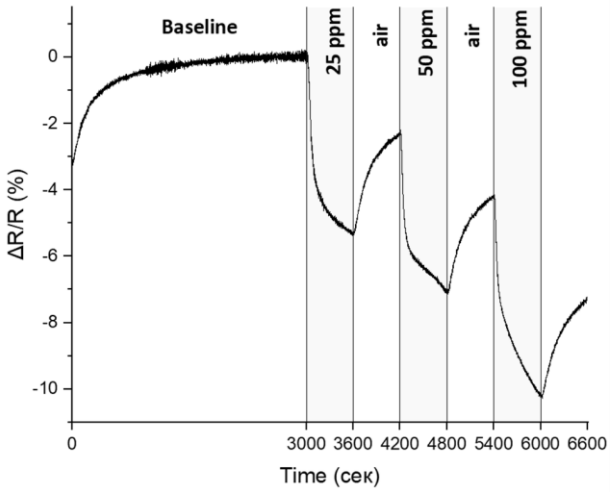


Рис. 1. Зависимость отклика функционализированного оловом датчика от времени.

Список литературы:

1. Lapekin, N. I., Golovakhin, V. V., Kim, E. Y., Bannov, A. G. NO2 Sensing Behavior of Compacted Chemically Treated Multi-Walled Carbon Nanotubes //Micromachines. – 2022. – Т. 13. – №. 9. – С. 1495.

УДК 536.2

СОХРАНЕНИЕ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ МЕДИ, ПРОГРЕВАЕМОЙ В ВОЗДУШНОЙ АТМОСФЕРЕ, ПРИ ПОМОЩИ ГРАФЕНОВОГО ПОКРЫТИЯ

Бойко Е.В.[1], Смовж Д.В.[1], Бердников В.С.[1], Михайлов А.В.[1]

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

Окисление меди ведет к увеличению его степени черноты, что приводит к более интенсивному излучению в инфракрасном диапазоне и, таким образом, увеличивает тепловые потери. Для минимизации теплового излучения в данной работе исследуется возможность использования графенового покрытия в качестве средства для стабилизации степени черноты меди. Графен, благодаря своим уникальным свойствам, таким как газонепроницаемость и химическая инертность, может эффективно предотвращать окисление медной поверхности [1]. Это, в свою очередь, помогает сохранить низкий коэффициент ($\varepsilon \approx 0.04$) черноты меди [2], снижая тем самым интенсивность излучения в инфракрасном диапазоне и уменьшая тепловые потери.

Целью данной работы является изучение возможности применения графена для стабилизации степени черноты меди и предотвращения её изменения при нагревании до 350 °C в воздушной атмосфере.

В качестве исследуемых объектов использовались медные цилиндры (h=2.9 см, d=1 см) двух типов: с покрытием графена и без покрытия. В обоих случаях поверхность меди была предварительно отполирована и отожжена в атмосфере водорода. Синтез графенового покрытия осуществлялся методом химического осаждения из газовой фазы [3].

Во время проведения экспериментов цилиндры были расположены вертикально, внутри размещался трубчатый электронагреватель (ТЭН) (h=2 см, d=0.6 см). Выделяемая тепловая мощность ТЭНа составляла 14.4 Вт. Температура измерялась при помощи термопар внутри медного цилиндра и на его поверхности. Для определения степени черноты использовались снимки, полученные с помощью тепловизионной камеры FLIR X6530sc и проанализированные в программном пакете FLIR Altair. Результаты представлены на рисунке 1.

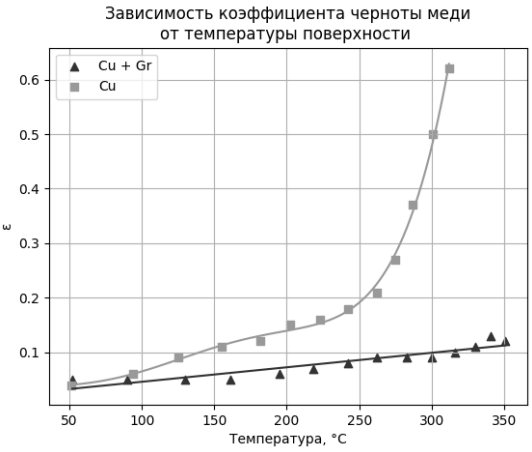


Рисунок 1. Изменение степени черноты меди при нагревании с графеновым покрытием и без — обозначены черным и серым цветами соответственно.

При температурах ниже 100 °C наличие графенового покрытия не оказывает существенного влияния на сохранность степени черноты, так как окислительные процессы при таких температурах протекают достаточно медленно. В обоих случаях коэффициент ε лежал в пределах 0.04 — 0.06. При дальнейшем повышении температуры до 250 °C изменение степени черноты имеет линейный характер для обоих типов образцов, но при отсутствии покрытия графена протекает быстрее: степень черноты возрастает до 0.18, в то время как для образца, покрытого графеном — возрастает до 0.08. При превышении 250 °C у медного образца без покрытия поверхность начинает интенсивно окисляться и наблюдается резкое повышение степени черноты — до 0.62. В то же самое время, степень черноты образца, покрытого графеном, практически не изменяется и составляет 0.12. Максимальная мощность радиационного излучения при этом составила 4117 Вт/м^2 и 1031 Вт/м^2 для медного цилиндра без покрытия и с графеновым покрытием соответственно.

Исследования проводились в условиях естественной конвекции: число Нуссельта находилось в пределах 8 — 11, что соответствует ламинарному режиму.

Таким образом, экспериментально показана возможность сохранения степени черноты для медных поверхностей при температурах до 350 °C.

Предложенная методика может применяться и для других поверхностей, подверженных окислению при прогреве в воздушной атмосфере до 350 °C.

Список литературы:

1. S. Chen, L. Brown, M. Levendorf, W. Cai, S. Y. Ju, J. Edgeworth, X. Li, C. W. Magnuson, A. Velamakanni, R. D. Piner, J. Kang, J. Park, and R. S. Ruoff, ACS Nano **5**, 1321 (2011).

2. Излучательные свойства твердых материалов: Справочник / Под общ. ред. чл.-кор. АН СССР А. Е. Шейндлина. - Москва: Энергия, 1974. - 471 с.

3. I. A. Kostogrud, K. V. Trusov, and D. V. Smovzh, Adv. Mater. Interfaces **3**, (2016).

УДК 544.032.6

МЕХАНИЗМ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ СМАЧИВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ НАНОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Васильев М.М.[1,2], Родионов А.А.[1], Шухов Ю.Г.[1], Старинский С.В.[1,3]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2
[3] 11635, Greece, Athens, Theoretical and Physical Chemistry Institute,
National Hellenic Research Foundation, 48 Vassileos Constantinou Ave

Контролируемое изменение свойств смачиваемости металлических поверхностей привлекает все большее внимание ввиду перспективности в таких задачах как улучшение антикоррозийных и самоочищающихся свойств, интенсификации теплообмена и т.д. [1–3]. Известно, что свойства смачиваемости поверхности определяется химическим составом и ее морфологией на микро-/наноуровне. На сегодняшний день существует множество методов для создания поверхностей с экстремальными свойствами смачивания так, например, фотолитографии, химическое осаждение из газовой фазы, химическое травление и т.д. Одним из наиболее перспективным методом обработки является импульсная лазерная абляция (ИЛА), которая позволяет в одностадийном порядке изготавливать поверхности с экстремальными свойствами смачивания [4–6]. Использование данного подхода позволяет широко варьировать основные свойства исследуемой поверхности, такие как микро- и наноструктура, свойства смачиваемости, шероховатость. Кроме вариативности параметров, ИЛА характеризуется своей универсальностью относительно выбора обрабатываемых материалов [7,8] и обладает высокой точностью. Также стоит отметить, что современные лазерные системы экологически безопасны, имеют высокую скорость обработки и степень автоматизации.

В данной работе исследуется влияние фонового окружения на морфологию и свойства смачивания поверхностей различных металлов при лазерной обработке методом импульсной лазерной абляции (ИЛА). Проанализированы механизмы изначальной гидрофилизации поверхностей металлов. Текстурирование поверхностей образцов было проведено с помощью твердотельного Nd:YAG лазера с длиной волны 1064 нм с гауссовым временным (длительность импульса 11 нс) и пространственным распределением лазерного импульса. Эффективная площадь пятна определялась по критерию $1/e^2$ и составляла $S_{eff} = 0{,}12$ мм^2. Эксперименты выполнены для плотностей энергии заметно выше пороговых для модификации материала.

Найдено, что основной причиной изначальных супергидрофильных состояний материала при наносекундной лазерной обработке является повторное осаждение продуктов абляции на поверхность материала (рис. 1.). Эти продукты создают нанопористый слой. Впоследствии этот слой становится сорбентом для различных примесей, что постепенно приводит к гидрофобизации большинства используемых материалов.

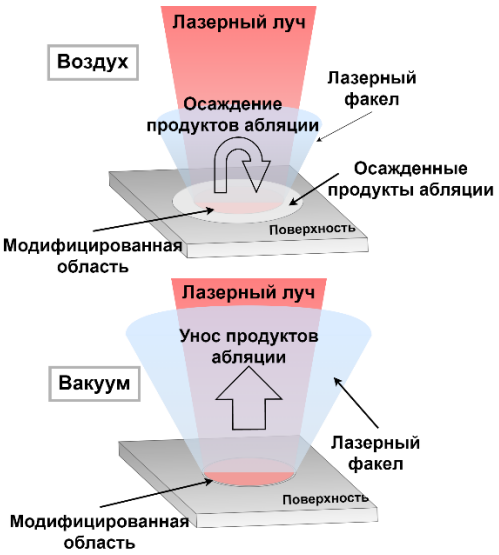


Рис. 1. Процесс абляции наносекундным лазером в условиях воздуха и вакуума.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 24-79-10070

Список литературы:

1. Zhang F. et al. Preparation of superhydrophobic films on titanium as effective corrosion barriers // Appl. Surf. Sci. Elsevier B.V., 2011. Vol. 257, № 7. P. 2587–2591.
2. Liu K., Yao X., Jiang L. Recent developments in bio-inspired special wettability // Chem. Soc. Rev. 2010. Vol. 39, № 8. P. 3240–3255.
3. Udaya Kumar G. et al. A review on the role of laser textured surfaces on boiling heat transfer // Appl. Therm. Eng. Elsevier, 2020. Vol. 174. P. 115274.
4. Long J. et al. Cassie-State Stability of Metallic Superhydrophobic Surfaces with Various Micro/Nanostructures Produced by a Femtosecond Laser // Langmuir. 2016. Vol. 32, № 4. P. 1065–1072.
5. Boinovich L.B., Emelyanenko A.M. The behaviour of fluoro- and hydrocarbon surfactants used for fabrication of superhydrophobic coatings at solid/water interface // Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp. Elsevier B.V., 2015. Vol. 481. P. 167–175.
6. Yan X. et al. Atmosphere-mediated superhydrophobicity of rationally designed micro/nanostructured surfaces: research-article // ACS Nano. American Chemical Society, 2019. Vol. 13, № 4. P. 4160–4173.
7. Starinskiy S. V. et al. Formation of periodic superhydrophilic microstructures by infrared nanosecond laser processing of single-crystal silicon // Appl. Surf. Sci. Elsevier, 2020. Vol. 512. P. 145753.
8. Starinskiy S. V., Shukhov Y.G., Bulgakov A. V. Laser-induced damage thresholds of gold, silver and their alloys in air and water // Appl. Surf. Sci. Elsevier B.V., 2017. Vol. 396. P. 1765–1774.

УДК 538.9

ФОРМИРОВАНИЕ ОДНОМЕРНЫХ НАНОСТРУКУТР В ЭЛЕКТРОДУГОВОМ РАЗРЯДЕ

Зайковский А.В.[1]

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

Использование электродугового разряда широко распространено в области получения наноматериалов, включая фуллерены, нанотрубки, графеновые хлопья, керамические, металлические, и различные композитные наноструктуры. Морфология и состав формируемых материалов зависят как от внутренних условий процессов формирования, так и от внешних параметров синтеза. В данной работе представлены результаты исследования процессов формирования и структуры одномерных наноструктур, получаемых в результате электродугового синтеза.

В основе электродугового синтеза наноструктур лежит распыление материала электродов и образования газообразных компонентов, которые при разлете из горячей области дугового разряда и охлаждении взаимодействуют друг с другом и рабочим газом, конденсируются, претерпевают химические и физические превращения и формируют структуру конечного наноматериала. Данные процессы могут происходить как в газовой фазе, так и на поверхности подложки, расположенной в камере реактора. Основными управляющими параметрами синтеза являются состав и давление рабочего газа, состав и форма распыляемых электродов, размер разрядного промежутка, электрические параметры дугового разряда, удаление и температура поверхности осаждения формируемых наноматериалов.

Никель является распространенным катализатором формирования углеродных наноструктур из метана, таких как графен и нанотрубки. Было установлено, что распыление электродов, содержащих никель, в среде пропан-бутановой смеси также приводит к формированию многостенных углеродных нанотрубок. Оптимальным давлением для формирования структуры нанотрубок является 200 Торр.

Также было обнаружено, что наночастицы SiO_2 могут выступать в роли катализаторов формирования бамбуковых углеродных нановолокон. Однако данные структуры формируются на поверхности подложки, разогретой до 500°C, в то время как на холодной поверхности с температурой 20°C бамбуковых структур не было обнаружено.

Кроме углеродных возможно формирование кремниевых нановолокон при распылении электродов, содержащих SiO_2 в своем составе.

Использование поверхности осаждения, разогретой до температуры 500°C приводит к формированию нановолокон Sn при распылении электродов, содержащих Sn в своем составе.

Распыление электродов, содержащих в своем составе CuO приводит к формированию Cu нановолокон, покрытых тонким слоем углерода. Содержание и размер данных волокон меняется при вариации силы тока дугового разряда и расстояния от оси разряда до места осаждения.

Подобные процессы приводят к формированию Sn нановолокон, покрытых углеродным оболочкой, при распылении электродов, содержащих SnO2 в своем составе. Кроме того, было установлено, что дополнительным параметром, определяющим размеры Sn нановолокон, является концентрация оловянного пара в области формирования нановолокон.

Принимая во внимание полученные результаты исследований, можно заключить, что в большинстве случаев формирование одномерных наноструктур в виде углеродных, или металлических волокон происходит на поверхности подложки, или на поверхности уже сформированных объектов. При этом, важным условием обеспечения роста нановолокон является присутствие повышенных температур и постоянное поступление паров материала для роста нановолокон. Для формирования углеродных нановолокон необходимо наличие каталитических наночастиц. А осаждение углеродного пара на уже сформированных, или формирующихся металлических волокнах может приводить к образованию углеродной оболочки вокруг этих волокон.

УДК 544.77

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КАТАЛИТИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ В ЖИДКОСТИ

Каргина А.М.[1,2*], Старинский С.В.[1]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Коллоидные растворы благодаря своим свойствам, таким как стабильность, гелеобразование и возможность переносить и распределять различные вещества в жидкостях, находят применение в медицине, пищевой промышленности, электронике, а также с их помощью происходит очищение воды [1]. В данной работе использован коллоидный раствор диоксид титана, так как он применяется в качестве белого пигмента в составе красок, лаков, эмалей, также он занимает важную нишу в фотокатализе, примером может служить фотокаталитическое разложение вредных органических соединений [2]. Наиболее часто в качестве фотокатализаторов используют диоксид титана, а именно его модификацию анатаз, что связано с ее высокой фотокаталитической активностью, высокой химической стабильностью и низкой стоимостью [3].

Для синтеза коллоидного раствора в данной работе использовалась Импульсная Лазерная Абляция в Жидкости (ИЛАЖ) из-за ряда преимуществ, а именно гибкости подбора параметров, локальности воздействия и совместимости с другими технологиями.

Несмотря на большой объем данных о контроле кристаллической фазы, описанный в литературе, получение образцов с помощью импульсной лазерной абляции по-прежнему остается сложной задачей, так как преимущественно при синтезе коллоидных растворов данным методом доминирующей оксидной фазой является рутил. Это объясняется тем, что фазовый переход анатаза в рутил происходит при высоких давлении и температуре и является необратимым.

Было сделано предположение о существовании энергетического окна, в котором при использовании пикосекундных импульсов возможно получение стабильных коллоидов с анатазом в качестве доминирующей оксидной фазы [4].

Для синтеза коллоидного раствора был задействован экспериментальный стенд, состоящий из управляемого координатного механизма и лазерной системы. Плотность энергии изменялась в диапазоне 10-14 Дж/см^2 при наносекундной длительности импульса, и равнялась 3 Дж/см^2 при пикосекундной длительности импульса.

Анализ оптических свойств полученной коллоидной системы производился на спектрографе СФ-2000, спектры пропускания были получены для раствора с наночастицами диоксид титана. При помощи закона Бугера-Ламберта-Бера:

$$I = I_0 e^{-k_\lambda d}$$

где I – интенсивность света, прошедшего через вещество, I_0 – интенсивность на входе в вещество, k_λ – показатель поглощения. Получены значения коэффициентов поглощения соответствующей длины волны (рис.2).

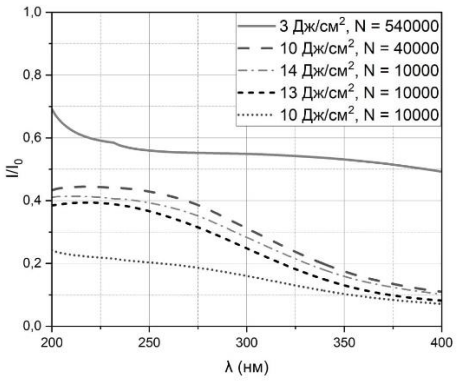


Рисунок 2. Спектры коллоидных растворов, полученные при τ=11 нс и τ=10 пс

Проведено сопоставление коэффициентов поглощения коллоидных растворов с литературными данными, и определена доминирующая оксидная фаза. Получена модификация диоксида титана – анатаз. Продемонстрировано что при наносекундных импульсах преобладающей оксидной фазой является рутил, при пикосекундных импульсах анатаз является наиболее распространенной формой при плотности энергии 3 Дж/см^2.

Список литературы:

1. Musaev O. R. et al. Influence of the liquid environment on the products formed from the laser ablation of tin // Applied Physics, 2013.
2. P.V. Kamat, D. Meisel, Semiconductor Nanocluster-Physical, Chemical and Catalytic Aspects, Elsevier, Amsterdam, 1997.
3. H. Almohammadi, A. Amirfazli, Sessile drop evaporation under an electric field, Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp. 555 (2018) 580–585.
4. E. Giorgetti, M. Muniz Miranda. TiO2 nanoparticles obtained by laser ablation in water: Influence of pulse energy and duration on the crystalline phase //Journal of Alloys and Compounds, 2014.

**a.kargina@g.nsu.ru*

УДК 536.46

РЕАКЦИОННАЯ ДИФФУЗИЯ И НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ СПЕКАНИИ ПОРОШКОВ Ti-Al-Fe-Fe_2O_3

Князева А.Г., Коростелева Е.Н., Анисимова М.А., Николаев И.О.

[1] Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
634055, Россия, Томск, пр. Академический, 2/4

Задачи реакционной диффузии встречаются в разных разделах материаловедения и имеют непосредственное отношение к формированию состава при синтезе новых материалов, эволюции состава в разных процессах поверхностной обработки и коррозии материалов и покрытий в химически активной среде. При формулировке соответствующих задач принимается во внимание, что стадиями, лимитирующими скорости химических реакций, являются диффузионные процессы. Простейшая модель теории реакционной диффузии – модель окисления Вагнера. В сложных средах кинетические особенности фазообразования связываются с наличием перекрестных диффузионных потоков; с влиянием на диффузию дефектов, механических напряжений и электромагнитных полей.

Подобные задачи были сформулированы при анализе процесса спекания порошков, содержащих металлическую стружку как отходы производства металлообработки. Вследствие неоднородного состава порошковой прессовки в условиях спекания в разных частях образца реализуются разные последовательности диффузионно-контролируемых процессов [1,2], которые приводят к разным вариантам диффузионно-химических задач с подвижными границами [3-5]. Большинство задач решается аналитически. В зависимости от интервала температур последовательность стадий также может изменяться.

Продукты взаимодействия являются тугоплавкими и обладают разными физическими и механическими свойствами, что приводит к появлению химических напряжений в локальных областях, которые также оцениваются на основе аналитических решений.

Например, в системе Fe_2O_3-Al (типичной металло-термической смеси) при избытке алюминия возможно образование оксида алюминия, интерметаллидов Fe_xAl_y и раствора железа в алюминии. Динамику границ раздела фаз иллюстрирует рис.1, что следует из аналитического решения.

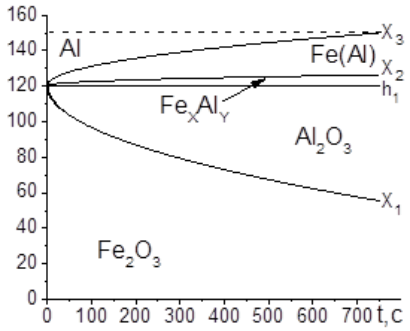


Рис. 1. Эволюция границ раздела фаз при диффузионно-реакционном взаимодействии Fe2O3 с Al

Подвижные границы X_3 и X_2 отделяют раствор от интерметаллида и чистого алюминия; граница X_1 – разделяет два оксида. В более сложной ситуации, например, частично окисленной металлической стружки, заключенной между титаном и алюминием, возможно формирование двух оксидов, интерметаллидов разного состава и тройных соединений, однако для диффузионно-контролируемых реакций параболический закон движения границ раздела фаз сохраняется.

Рассматривая стружку как плоский объект, для оценки механических напряжений, связанных с изменением состава, можем использовать решения задачи о равновесии плоской составной пластины с разными свойствами слоев. В этом случае напряжения, в направлении, перпендикулярном плоскостям раздела фаз, равны нулю, а напряжения в двух других направлениях одинаковы и следуют из соотношения:

$$\sigma = \frac{E}{1-\nu}\left[-\frac{\omega}{3} + \left(Nx + M\right)\right],$$

где модуль упругости E и коэффициент Пуассона ν – кусочно-непрерывные функции; вид функции ω и «постоянные» интегрирования N,M зависят от распределения концентраций и положения границ раздела фаз. Расчеты показывают, что максимальные напряжения находятся вблизи границ раздела X_2 оксида алюминия и интерметаллидов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда и субсидии Администрации Томской области, грант № 22-13-20031, https://rscf.ru/project/22-13-20031/

Список литературы:

1. Korosteleva E. N., Knyazeva A. G. and Nikolaev I. O. Phase Formation in Reactive Sintering with Reduction // Physical mesomechanics. 2023. V. 26, pp. 39–47
2. Anisimova M. and Knyazeva A. Basic models of phase formation at the mesolevel under reactive sintering of Ti-Al-Fe_2O_3 powder mixture. – in Proceeding of 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects. 2022, doi: 10.56761/EFRE2022.N1-P-051402
3. Knyazeva A.G., Anisimova M. A. and Korosteleva E. N. Features of diffusion-controlled processes of regulated volumetric synthesis from powder mixtures Ti–Al–Fe–Fe_2O_3 // PNRPU Mechanics Bulletin. 2022. No. 3. pp. 125-134.
4. Korosteleva E. N., Knyazeva A. G., Anisimova M. A. and Nikolaev I. O. The impact of impurities on the Al–Fe–C system phase composition changes during sintering // Powder Metallurgy and Functional Coatings. 2023. v. 17. No. 2, pp. 5–13
5. Анисимова М.А., Князева А.Г., Е.Н. Коростелева, Николаев И.О., Фазообразование при синтезе композита в условиях реакционного спекания из смеси порошков Ti+Al+Fe2O3+(Fe+C) // Известия Высших учебных заведений. Физика. 2023. Т. 66, № 11. С. 7-16.

УДК 539.23

НАНЕСЕНИЕ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ СВЕРХТОНКИХ ПЛЕНОК ЗОЛОТА НА ПОДЛОЖКИ КРЕМНИЯ И КВАРЦА

Д.А. Колосовский[1], Т.М. Залялов[2], С.А. Пономарев[2], Ю.Г. Шухов[1], А.А. Морозов[1], С.В. Старинский[1]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН,
630073, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 13

Сверхтонкие пленки золота, толщиной менее 10 нм, активно используются в гибких прозрачных электродах для оптоэлектронных приборов, тонкопленочных солнечных элементах, дисплеях и сенсорных экранах, фотодетекторах и светодиодах [1]. Выращивание сплошных и сверхтонких пленок золота на различных подложках, таких как кварц, оксид кремния, нитрид кремния, графен и т.д., как известно, затруднено из-за плохого смачивания золотом этих подложек, что приводит к формированию трехмерных островков на начальных этапах роста пленки. Формирование металлической пленки происходит по следующему механизму: зарождение островков, рост островков, слияние островков, перколяция и заполнение каналов с образованием сплошной тонкой пленки. Для снижения порога перколяции сверхтонких пленок золота обычно используют адгезионные или затравочные слои [1], а также охлаждение подложки до криогенных температур [2]. Однако, использование адгезионных слоев приводит к увеличению оптических потерь и несовместимостью с требованиями оптоэлектронных устройств, а охлаждение подложки до криогенной температуры является сложной технологической задачей. В данной работе предлагается использовать метод импульсной лазерной абляции (ИЛА) для напыления сверхтонких пленок золота.

Напыление пленок осуществлялось в вакуумной камере в атмосфере кислорода при давлении 10 Па с помощью твердотельного импульсного Nd:YAG лазера с длиной волны (λ) 532 нм. Анализ морфологии поверхности пленок проводился методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) на микроскопе Bruker Multimode 8 и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе JEOL JSM 6700F. Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) пленок проводилось на зондовой станции, оснащенной параметрическим анализатором полупроводниковых приборов Keithley 4200-SCS Semiconductor с модулем измерения сверхмалых токов 4210-SMU.

Результаты измерения ВАХ показали, что с уменьшением толщины пленок золота с 7,4 нм до 3,9 нм сопротивление растет с 50 Ом до 370 Ом, что говорит о хорошей электропроводности пленок. Увеличение электрического сопротивления с уменьшением толщины связано с перколяцией пленок. Анализ морфологии поверхности показал, что среднеквадратичная шероховатость поверхности не превышает 0.7 нм, что соответствуют 2-3 монослоям. Параметр сплошности пленок, отношение площади поверхности, занимаемой пленкой, к площади подложки, варьируется от 1 до 0,9 для пленок толщиной 10 – 5 нм, в то время как в литературе такой параметр достигается лишь при охлаждении подложки до температуры 153 К [2].

В работе показано, что методом ИЛА можно напылять проводящие сверхтонкие пленки золота, толщиной менее 5 нм, на подложки кремния и кварца без использования адгезионных слоев и/или охлаждения подложки до криогенных температур.

Список литературы:

1. Yakubovsky D. I. et al. Ultrathin and ultrasmooth gold films on monolayer MoS2 //Advanced Materials Interfaces. – 2019. – Т. 6. – №. 13. – С. 1900196.
2. Lemasters R. et al. Ultrathin wetting layer-free plasmonic gold films //ACS Photonics. – 2019. – Т. 6. – №. 11. – С. 2600-2606.

УДК 533.17: 541.64

СОЗДАНИЕ ГИДРОФОБНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ АЛЮМИНИЯ КОМБИНАЦИЕЙ МЕТОДОВ АНОДИРОВАНИЯ И HW CVD

Ляпустин И.Н.[1,2], Петрова А.В.[2], Сафонов А.И.[2]

[1] Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

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

Замерзание капель на поверхностях является обычным явлением в природе и имеет важное значение для эффективности и безопасности при выработке и транспортировке электроэнергии, в строительстве, воздушном, наземном и морском транспорте и т. д. Современные подходы к отталкиванию льда являются ресурсоемкими, основанными на использовании химикатов или высоком потреблении энергии. По этой причине существует потребность в разработке новых пассивных подходов к предотвращению льдообразования. Эти подходы связаны с применением устойчивых супергидрофобных поверхностей. На таких поверхностях за счёт их уникального свойства происходит отталкивание переохлаждённых капель воды, задержание процесса замерзания, отслаивание образовавшегося льда в результате его низкой адгезии к ним. Однако, одной из основных проблем антиобледенительных покрытий является их деградация в результате эрозии, вызванной периодическим разрушением приповерхностных слоёв кристалликами льда [1]. Авторы работы предлагают решить эту проблему созданием на поверхности алюминия упорядоченного оксидного слоя с глубокими микро- и нанопорами, заполненными гидрофобным фторполимером. Такое композитное покрытие сможет длительное время сохранять свои супергидрофобные свойства, благодаря повышенной прочности оксида алюминия, большой толщине покрытия и заполненности пор гидрофобным фторполимером.

В представленной работе такие композитные покрытия были получены путём комбинации методов электрохимического окисления (анодирования) [2] и Hot Wire CVD [3]. С помощью электрохимического оксидирования на поверхности алюминия создавался пористый оксидный слой с заданным строением. Управление строением оксидного слоя производилось путём регулирования параметров в процессе анодирования (плотность тока, напряжение, время экспозиции и др.). Методом HW CVD на поверхность образовавшихся пор осаждалось фторполимерное покрытие. Выбор представленных методов обусловлен тем, что он не требует дорогостоящего высокотехнологичного оборудования, и они могут быть применены на различных производственных площадках.

Обработанные поверхности до и после осаждения фторполимерного покрытия исследовались методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на приборе JEOL JSM-6700F. Была получена информация об их морфологии и элементном составе. Измерение смачиваемости полученных композитных покрытий водой производилось методом лежащей капли на установке DSA-E100 KRUSS.

Анализ СЭМ-микрофотографий полученных покрытий показывает, что в результате обработки происходит формирование упорядоченной пористой структуры из оксида алюминия. Строение пор зависит от параметров процесса обработки поверхности. При осаждении фторполимерное покрытие глубоко проникает в поры и заполняет их, формируя таким образом композит. Измерения смачивания показали, что полученные композитные покрытия обладают супергидрофобными свойствами. Краевой угол смачивания составляет от 155° до 165° и зависит от строения поверхности композитного покрытия.

В результате проведённого исследования было показано, что предложенный подход позволяет получать композитные покрытия на поверхности алюминия, состоящие из пористой пленки оксида алюминия и фторполимера. Полученные композитные покрытия обладают устойчивыми супергидрофобными свойствами.

Список литературы:

1. Kreder M.J., Alvarenga J., Kim P., Aizenberg J. Design of anti-icing surfaces: smooth, textured or slippery? // Nat. Rev. Mater. 2016. Vol. 1. P. 15003.
2. Пористые анодные оксиды алюминия и титана: структура, свойства, синтез: учеб. пособие / Д.И. Петухов, Р.Г. Валеев, С.М. Решетников. Ижевск: Издательский центр «Удмуртский университет», 2018. 122 с.
3. Safonov A.I., Sulyaeva V.S., Gatapova E.Y., Starinskiy S.V., Timoshenko N.I., Kabov O.A. Deposition features and wettability behavior of fluoropolymer coatings from hexafluoropropylene oxide activated by NiCr wire // Thin Solid Films. 2018. Vol. 653. P. 165–172.

Работа выполнена при поддержке госбюджетного гранта ИТ СО РАН.

УДК 621.9

ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ ТОЛЩИН СЛОЕВ АЛЮМИНИЯ И АМОРФНОГО КРЕМНИЯ НА ПРОЦЕСС АЛЮМИНИЙ-ИНДУЦИРОВАННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Меркулова И.Е.[1], Баранов Е.А.[1], Замчий А.О.[1], Константинов В.О.[1], Самохвалов Ф.А.[1], Родионов А.А.[1]

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

На данный момент, одной из наиболее привлекательных задач для современной электроники и солнечной энергетики является внедрение технологий изготовления кремния на дешевых и низкотемпературных подложках (например, стекле). Одним из наиболее перспективных подходов для получения тонких пленок поликристаллического кремния (поликремния) на стекле при низких температурах и малых временах отжига является метод алюминий-индуцированной кристаллизации (aluminum induced crystallization, AIC) аморфного кремния (a-Si) [1]. Данный метод позволяет получать пленки поликремния при низких температурах (ниже точки эвтектики системы “Al/Si” – 577 °C) и малых временах отжига [1]. Например, в результате AIC аморфного кремния в компоновке «стекло/алюминий/аморфный кремний» происходит макроскопический обмен слоями между алюминием и кремнием, в результате которого образуется слой поликремния на стеклянной подложке. Однако, стоит отметить, что процесс рекомбинации свободных носителей заряда на границах кристаллитов поликремния отрицательно влияет на КПД солнечных элементов такого типа. В связи с этим, актуальной задачей становится увеличение среднего размера кристаллита поликремния, формирующегося в процессе AIC. В данной работе проведено исследование по влиянию соотношения толщин слоев a-Si и Al на процесс алюминий-индуцированной кристаллизации для образцов с исходной компоновкой «стекло/алюминий/мембраный слой/аморфный кремний».

В ходе подготовки образцов, пленки алюминия толщиной порядка 105 нм наносились на стеклянную подложку методом термовакуумного напыления при комнатной температуре. Затем пленки выдерживались на атмосфере в течение 2 часов для формирования тонкого мембранного слоя AlO_x толщиной около 2 нм. Далее методом магнетронного распыления осаждались тонкие пленки a-Si различной толщины: 65 нм, 80 нм, 95 нм, 125 нм. Скорость роста пленки составляла примерно 10 нм/мин, а толщина пленки контролировалась временем осаждения. После определения толщин пленок по поперечному сколу образцов с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), было получено соотношение толщин слоев a-Si/Al в исходных образцах: 0.6, 0.8, 0.9, 1.2. Были получены спектры пропускания исходных образцов в инфракрасном диапазоне (FTIR) для определения концентрации кислорода в пленках кремния. Проведенная оценка содержания связанного кислорода в пленках кремния показала, что его концентрация составляет примерно 1.3 атомных процента. Также были получены данные о морфологии поверхности методом атомно-силовой микроскопии (AFM).

Для получения слоя поликремния на стекле, синтезированные образцы подвергались высоковакуумному отжигу при температурах 470, 490 и 510 °C при давлении в вакуумной камере 10^{-5} Па. Длительность отжига составила 45 – 88 часов. Время завершения процесса кристаллизации определялось in situ с использованием оптической микроскопии.

Для анализа кристаллической структуры образцов применялась спектроскопия комбинационного рассеяния света (Raman) со стороны пленки и подложки. Для изучения фазового состава образцов был использован метод рентгенофазного анализа (XRD). Дифрактограммы образцов, полученные при температуре отжига 490 °C подтвердили наличие в полученных структурах кристаллического кремния. Это подтверждается наличием высокоинтенсивного рефлекса с центром на 28.5°, соответствующего материалу с кристаллографической ориентацией (111), а также менее интенсивных пиков с центрами на 47.4° и 56.3°, соответствующих плоскостям (220) и (311).

Также с помощью метода оптической микроскопии (ОМ) была изучена поверхностная морфология образцов и кинетика процесса кристаллизации аморфного кремния. Для всех образцов наблюдался процесс обмена слоями и рост кристаллитов кремния дендритной структуры. В зависимости от соотношения исходных слоев a-Si/Al, были получены степень покрытия поверхности поликристаллическим кремнием, плотность зародышеобразования и средний размер кристаллита кремния.

Список литературы:

1. Nast O. et al. Aluminum-induced crystallization of amorphous silicon on glass substrates above and below the eutectic temperature //Applied Physics Letters. – 1998. – Т. 73. – №. 22. – С. 3214-3216.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10079, https://rscf.ru/project/22-79-10079/ (синтез и отжиг тонких пленок) и в рамках государственного задания Института Теплофизики СО РАН № АААА-А19-119061490008-3 (метод АСМ для диагностики образцов).

УДК 539.196.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ CVD СИНТЕЗА ГРАФЕНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕАКЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА REAXFF

Рябов В.О.[1], Андрющенко В.А.[1,2], Глуздов Д.С. [1,2]

[1]Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова 2
[2]Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Графен, представляющий собой двумерный лист из атомов углерода, расположенных в виде сотовой решетки, привлек к себе значительное внимание с момента его выделения в 2004 году благодаря своим замечательным физическим и химическим свойствам. К ним относятся исключительная электропроводность, механическая прочность и теплопроводность, которые делают его перспективным материалом для широкого спектра применений. [1].

Одним из наиболее эффективных методов получения высококачественного графена является химическое осаждение из газовой фазы (CVD). Этот метод включает разложение углеводородных газов на металлической подложке, обычно медной или никелевой, при высоких температурах, в результате чего образуются слои графена. Есть ряд работ по моделированию CVD синтеза графена [2-5], в данных работах проведено моделирование осаждения атомов углерода на подложки из меди или никеля с различными потенциалами взаимодействия между атомами. Основными результатами в данных работах было лишь качественное описание отличий между получившимися графеновыми пленками при различных температурах, однако число атомов газа и подложки было небольшое (несколько сотен).

В данной работе было проведено молекулярно-динамическое моделирование CVD синтеза графена на подложке из никеля с кристаллографической ориентацией (111) при различных температурах системы от 300K до 1750K. Моделирование проведено в пакете программ (Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator), где в качестве потенциала взаимодействия использовался потенциал ReaxFF [6], характерный вид частично сформировавшегося графенового покрытия при температуре 700K представлен на рисунке 1.

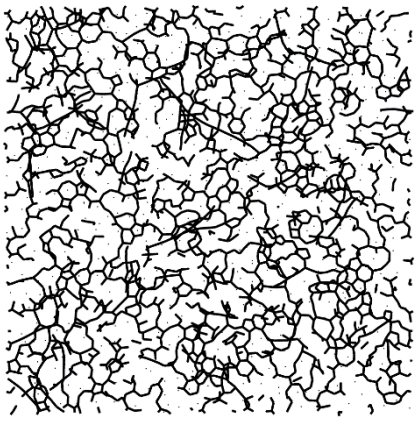


Рисунок 1: Изображение частично сформировавшегося графенового покрытия на поверхности никелевой подложки при температуре 700K.

На рисунке 2 представлено распределение плотности атомов никеля красным цветом и атомов углерода синим цветом вдоль оси z направленной перпендикулярно поверхности подложки, как можно видеть из данного рисунка, помимо осаждения атомов углерода на никелевую подложку имеет место проникновение атомов углерода в слои подложки, причем с увеличением температуры глубина проникновения увеличивается.

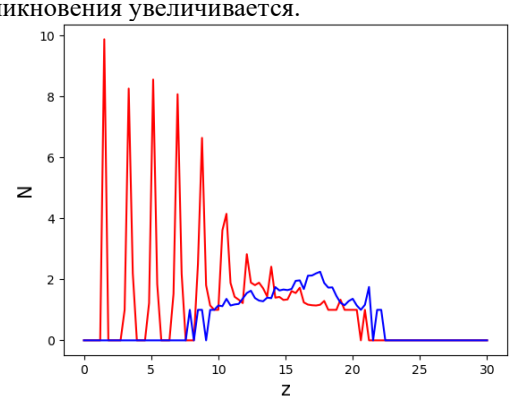


Рисунок 2: Распределение плотности атомов никеля, обозначено красным цветом, и углерода обозначено синим цветом вдоль оси z.

Список литературы:

1. Novoselov, K. S.; Geim, A. K.; Morozov, S. V.; Jiang, D.; Zhang, Y.; Dubonos, S. V.; Grigorieva, I. V.; Firsov, A. A. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. Science 2004, 306, 666–669.
2. Meng et al., Molecular Dynamics Simulation of Chemical Vapor Deposition Graphene Growth on Ni (111) Surface, J. Phys. Chem. C 2012, 116, 10, 6097–6102
3. Meng et al., Defect Healing of Chemical Vapor Deposition Graphene Growth by Metal Substrate Step, J. Phys. Chem. C 2012, 116, 10, 6097–6102
4. Rasuli et al., Molecular dynamics simulation of graphene growth on Ni (100) facet by chemical vapor deposition. Journal of Applied Physics, 115(2)
5. Zhang et al., A molecular dynamics simulation of the graphene growth on Cu (111) surface, Computational Materials Science, 130, 10-15.
6. Tavazza et al. "Molecular dynamics investigation of the effects of tip–substrate interactions during nanoindentation." The Journal of Physical Chemistry C 119.24 (2015): 13580-13589.

УДК 544.032.65

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ ЗОЛОТО-ИНДУЦИРОВАННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ АМОРФНО КРЕМНИЯ И АМОРФНОГО СУБОКСИДА КРЕМНИЯ

Самохвалов Ф.А.[1,2], Смирнов Н.И[1,2]., Родионов А.А.[1], Старинский С.В.[1]

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

[2] Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Тонкоплёночные поликристаллические кремниевые структуры это основные материалы для современных технологий в таких областях, как микроэлектроника, наноэлектроника, оптоэлектроника, фотовольтаика. Из них изготавливают такие элементы как диоды [1], резисторы, биполярные и полевые транзисторы [2], а также солнечные элементы на стекле [3]. Для промышленности очень важно получение подобных структур на дешёвых, легкоплавких подложках, таких как стекло или пластик. Традиционные методы получения поликремния включают в себя переход предварительно осаждённого аморфного кремния в поликристаллическое состояние путём длительного отжига в вакууме. Такой процесс требует высоких температур, более 600˚С, при которых неизбежно повреждается подложка.

Существуют альтернативные методы, позволяющие получать плёнки поликристаллического кремния высокого качества. Метал-индуцированная кристаллизация (МИК) [4] позволяет снизить характерные температуры процесса на сотни градусов, до 175˚С [5] в случае использования золота. В основе МИК лежит эффект эвтектики, который при взаимодействии кремния с металлом в определённых пропорциях понижает температуру плавления, соответственно и температурный порог рекристаллизации. Но МИК длительный процесс, занимает десятки часов, требует глубокого вакуума. Другой подход – лазерно-индуцированная кристаллизация (ЛИК) [6]. К основным преимуществам ЛИК можно отнести высокую скорость процесса, возможность исключить глубокий вакуум. Также, на данный момент, плёнки поликремния с самым большим размером зерна получают именно таким методом. Однако локальность поглощения лазерного излучения приводит к неравномерной кристаллизации плёнки. Данный метод также чувствителен к неоднородностям или загрязнению материала, которые приводят к интенсивному поглощению лазерного излучения и возможной деструкции плёнки.

Целью данной работы было исследование метода лазерной метал-индуцированной кристаллизации, включающей в себя достоинства МИК и ЛИК. В качестве донорного металла выбрано золото, так как это один из самых популярных металлов для метал-индуцированной кристаллизации, образует с кремнием точку эвтектики с самой низкой температурой, не окисляется, не образует силициды, используется для синтеза плазмонных наночастиц [7]. Экспериментальный образец представляет собой двуслойную структуру a-SiO_x/Au/Sio_2 из плёнки золота, толщиной 30 нм, и плёнки аморфного кремния, толщиной 130 нм. В ходе исследования лазерной золото-индуцированной кристаллизации были изучены два режима облучения, в первом поглощающим слоем был аморфный кремний, во втором – золото. В первом случае лазерная обработка проводилась лазерным излучением с длинной волны 532 нм, в этом случае золото выступает только в роли катализатора, а всё излучение поглощается кремнием. Во втором случае использовался ИК лазер с длинной волны 1064 нм, при этом золото выступает и как катализатор, и как источник тепла, так как аморфный кремний прозрачен в этой области спектра. Лазерный луч имел Гауссов пространственный профиль, что позволяло рассчитать плотность энергии падающего излучения в любой точке лазерного пятна. Были проведены эксперименты с разной морфологией золота, а также при разных фоновых условиях, в воздухе и в вакууме.

Найдено, что метод лазерной золото-индуцированной кристаллизации нестехиометрического субоксида кремния позволяет кристаллизовать кремний в широком диапазоне условий. Показаны особенности лазерной обработки в различных условиях. Добавление слоя золота значительно понижает энергетический порог кристаллизации. Подробно исследована морфология плёнки после лазерной обработки, проведён элементный анализ полученных структур.

Список литературы:

1. Brotherton S.D. Polycrystalline Silicon Thin Film Transistors (Poly-Si TFTs) // Handbook of Visual Display Technology. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. P. 647–673.
2. Z. Wang, L.P.H. Jeurgens, E.J. Mittemeijer, Metal-Induced crystallization: Fundamentals and applications, CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, FL, USA, 2015.
3. Varlamov S. et al. Polycrystalline silicon on glass thin-film solar cells: A transition from solid-phase to liquid-phase crystallised silicon // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 2013. Vol. 119. P. 246–255.
4. Toko K., Suemasu T. Metal-induced layer exchange of group IV materials // J. Phys. D. Appl. Phys. 2020. Vol. 53, № 37. P. 373002.
5. Knaepen W. et al. In-situ X-ray Diffraction study of Metal Induced Crystallization of amorphous silicon // Thin Solid Films. 2008. Vol. 516, № 15. P. 4946-4952.
6. Bronnikov K. et al. Large-Scale and Localized Laser Crystalliza-tion of Optically Thick Amorphous Silicon Films by Near-IR Femtosecond Pulses // Materials (Basel). 2020. Vol. 13, № 22. P. 5296.
7. G. Faraone, et al., Opt. Mater. 75, 204 (2018)

Работа выполнена в рамках проекта РНФ №22-79-10079

Секция: Многофазные прецизионные технологии

УДК 536.4

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРИМЕСЕЙ В РАСПЫЛЕННЫХ КАПЛЯХ ВОДЫ

Волков Р.С.[1], Керимбекова С.А.[1], Стрижак П.А.[1,2]

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

[2]Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН»,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1

Понимание физики протекающих процессов при движении капель жидкости с примесями через высокотемпературные газы (более 600 К) важно для создания новых технологий термической очистки вод, в частности сточных и промышленных, или усовершенствования используемых в настоящее время. В последнее десятилетие технологии очистки воды и различных эмульсий на ее основе [1] активное развитие. В настоящее время нет законченной теории тепломассопереноса и фазовых превращений для таких условий. Наибольшую сложность вызывает идентификация примесей в каплях очищаемой воды в процессе распыления. В технологиях термической очистки жидкости сформировались две основные проблемы: высокие затраты энергии и большая длительность времени термообработки [2]. Анализ современного состояния данной научной области показал недостаточность теоретических и экспериментальных исследований идентификации примесей в каплях в динамике, что обусловлено большим количеством границ раздела сред с нелинейными краевыми условиями (интенсивное парообразование) при математическом моделировании.

Актуальной задачей в области эффективных способов очистки является определение в составе каплях жидкости растворимых и нерастворимых примесей, металлов, песка, ила и пр. Наличие последних значительно интенсифицирует процесс испарения неоднородных капель. Это обусловлено тем, что теплофизические (теплопроводность, теплоемкость и температуропроводность) и оптические характеристики неоднородных выше по сравнению с водой без примесей. По этой причине перспективна задача идентификация отдельных твердых и жидких компонентов в аэрозольном потоке, которая решаема использованием бесконтактных панорамных оптических техник: плоскостная лазерная индуцированная флуоресценция, интерферометрическая техника, теневая макросъемка.

Метод лазерной индуцированной флуоресценции (LIF) [3] основан на регистрации естественной флуоресценции молекул флуорофора (органического красителя), возбуждаемой лазерным излучением, специализированными видеокамерами с набором оптических светофильтров. Как правило, используются следующие флуоресцентные красители [3]: Rhodamine B, Rhodamine 6G, Sulforhodamine B.

Идентификация добавок и примесей в составе капель жидкостей с использованием интерферометрической техники (предполагает усиление или ослабление амплитуды результирующей волны в зависимости от соотношения между фазами складывающихся в пространстве двух или нескольких волн с одинаковыми периодами. Известны результаты [4], с применением которых обоснована возможность применения интерференционной техники для определения типа и концентрации примеси твердых частиц в каплях воды по их интерференционной картине. Так, установлено влияние типа и концентрации примеси на интегральные характеристики интерференционных картин (количество и вид), а также предложен подход к определению концентрации и размеров частиц примеси, основанный на анализе интерференционных картин [4].

Возможна также идентификация добавок и примесей в составе капель жидкостей с использованием теневой макросъемки (метод теневой фотографии). Она представляет оптическую методику [5], в которой исследуемый объект подсвечивается источником со стороны, противоположной средству видеофиксации (видеокамере). Световой поток находится на одной оптической оси с видеокамерой и направлен в сторону объектива. Такой подход приводит к тому, что на фото объект исследования визуализируется как тень с четкими границами. Для получения контрастного (не размытого) изображения движущегося объекта используются световые прожекторы и высокоскоростные CMOS видеокамеры с очень малым временем экспозиции (1–5 мс).

Список литературы:

1. Yin Z., Nau P., Meier W. Responses of combustor surface temperature to flame shape transitions in a turbulent bi–stable swirl flame // Experimental Thermal and Fluid Science.2017. V. 82. P. 50-57.
2. Bąk A., Podgórska W. Investigation of drop breakage and coalescence in the liquid–liquid system with nonionic surfactants Tween 20 and Tween 80 // Chemical Engineering Science. 2012. V. 74. P. 181–191.
3. Volkov R.S., Kuznetsov G. V., Strizhak P.A. Experimental investigation of mixtures and foreign inclusions in water droplets influence on integral characteristics of their evaporation during motion through high–temperature gas area // International Journal of Thermal Sciences. 2015. V. 88. P. 193–200.
4. Volkov R.S., Chvanov S.V., Andriyanov D.D. Diagnostics of the Presence of Solid Particles in Aqueous Aerosol Droplets by Their Interference Pattern // Technical Physics Letters. – 2019. – Vol. 45. – P. 605–608.
5. Копылов Н.П., Хасанов И.Р., Кузнецов Г.В., Федотки Е.А. Москвилин Д.В., Стрижак П.А. Повышение эффективности тушения лесных пожаров с использованием добавок к воде // Пожарная безопасность. 2015. Т. 4.С. 46–50.

Исследование поддержано грантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение №075-15-2024-620

УДК 621.9

ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРАТОВ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ГОРЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ЖИДКИХ ТОПЛИВ ИЗ ОТХОДОВ

Волков Р.С.[1], Керимбекова С.А.[1], Подгорная Е.Р.[1], Стрижак П.А.[1,2], Шлегель Н.Е.[1],
[1] Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, Россия, Томск, проспект Ленина, 30
[2] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Нефтешламы относятся к твердым нефтесодержащим отходам промышленности [1]. Сырой нефтесодержащий шлам представляет собой трудноразделимую эмульсию воды, нефти и минеральных примесей, иногда с примесью поверхностно–активных веществ [2,3]. Подсчитано, что на каждые 1000 тонн добытой нефти приходится практически 5 тонн нефтешлама. Нефтешлам имеет большую рециркуляционную ценность, поскольку в его составе содержится значительное количество нефтяных веществ [4].

Метод сжигания позволяет утилизировать нефтяные отходы при параллельной выработке тепловой и электрической энергии. Метод основан на воспламенении нефти, входящей в состав нефтешламов, в присутствии избытка воздуха. Однако в результате такого сжигания образуются дымовые газы с высокими концентрациями антропогенных веществ, которые необходимо нейтрализовать. Не редко нефтешлам сжигают совместно с высококалорийным топливом (уголь, газ, дизельное топливо) для увеличения его теплоты сгорания.

Предлагается совместное сжигание отходов нефтяной промышленности с гидратным газом. Использование гидратного газа в качестве подсветки факела позволит увеличить калорийность топлива и нейтрализовать вредные антропогенные выбросы за счет содержания в нем паров воды. Технологии совместного сжигания газовых гидратов с продуктами нефтепереработки и отходами нефтяной промышленности еще не являются разработанными. Одной из основных проблем является поиск критических тепловых условий, при которых гидратный газ обеспечит стабильное горение продуктов нефтепереработки и отходов нефтяной промышленности.

Первый этап экспериментальных исследований заключался в определении оптимальных расходов жидкого топлива (G_l) (мазута или нефтешлама), газа (G_g) и воздуха (G_{air}). Расход воздуха являлся постоянным и составлял около 240 м^3/ч при его температуре около 20 °С. Расход газообразного и жидкого топлива выбирался таким образом, что при совместном сжигании обеспечивалось стабильное горение (без срыва пламени) более 5 минут. Так, расход мазута составлял около 5,17 кг/ч, расход нефтешлама около 7,49 кг/ч, при этом расход газа около 0,62 м^3/ч.

На втором этапе экспериментальных исследований определялась вероятность отсутствия срыва пламени (P_{bt}) после пяти минут горения исследуемых топлив при разных значениях отношения их расходов. Анализ полученных результатов (см. рис. 1) позволил установить оптимальные соотношения расходов исследуемых топлив при их совместном сжигании. Так, стабильное горение нефтешлама с газообразным топливом достигается при большем соотношении (G_l/G_g ≈ 25-27), чем у мазута с газообразным топливом (G_l/G_g ≈ 19-21). Это обусловлено тем, что мазут представляет собой готовое топливо, т.е. не содержит в себе лишней влаги и механических примесей, а нефтешлам является отходом нефтепромышленности и содержит большое количество влаги и механических примесей (около 51 %). При смещении отношения расходов в меньшую сторону происходит срыв пламени. Это связано с тем, что потоки жидкого топлива не пересекаются с потоком факела газообразного топлива и не зажигаются. При увеличении отношения расходов в большую сторону происходит срыв пламени из-за недостатка окислителя в камере сгорания.

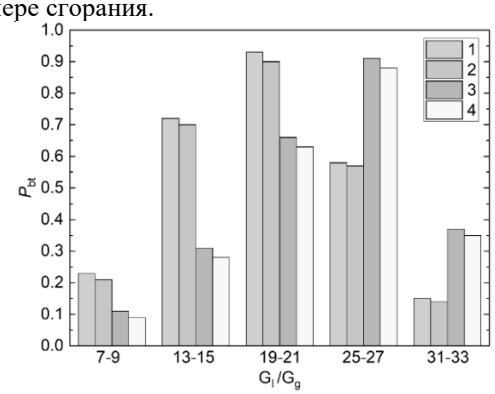


Рис. 1. Вероятность отсутствия срыва пламени после пяти минут горения исследуемых топлив для разных значений отношения их расходов: 1 – гидратный газ с мазутом; 2 – метан с мазутом; 3 – гидратный газ с нефтешламом; 4 – метан с нефтешламом.

Список литературы:

1. Ubani O, Atagana H.I, Thantsha M.S. Biological degradation of oil sludge: A review of the current state of development// African J Biotechnol. 2013. Т. 12. № 47. С. 6544–6567.
2. He Y, Wang Z, Wang J. Investigation of pyrolytic characteristics of three oily sludges with focus on properties of oil product// J Anal Appl Pyrolysis. 2023. Т. 174. № 106114.
3. Gan Z, Zhao C, Li Y, Chen G, Song Z, Zhang Z, et al. Experimental investigation on smoldering combustion for oil sludge treatment: Influence of key parameters and product analysis// Fuel. 2022. Т. 316. № 123354.
4. Qunxing H, Xu H, Feiyan M, Yong C, Jianhua Y. Effect of the Particle Surface on Oil Recovery from Petroleum Sludge //Energy & Fuels. 2014. Т. 28. №. 7. С. 4480-4485.

Исследование поддержано грантом Министерства науки и высшего образования РФ, Соглашение №075-15-2024-620

УДК 536.242

ИЗУЧЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО КРИЗИСА ПУЗЫРЬКОВОГО КИПЕНИЯ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ТОНКОМ СЛОЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ HFE-7100

Жуков В.И.[1,2], Павленко А.Н.[1]

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

[2] Новосибирский государственный технический университет,
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Для иммерсионного охлаждения элементов микро и силовой электроники применяются диэлектрические жидкости. Температура насыщения для этих жидкостей при атмосферном давлении ~ (30–65) °С при допустимой температуре нагрева устройств ~ 85°С. Критический тепловой поток (КТП) ограничивает максимальные тепловые потоки, которые могут быть отведены с поверхности устройства при его охлаждении. Предполагается, что применение тонких слоев жидкости может существенно уменьшить массогабаритные характеристики оборудования и потребление теплоносителя. Изучение величины КТП в слоях различной высоты является важной исследовательской задачей. Кутателадзе в своей работе [1] рассматривал переход к КТП со стороны пузырькового кипения. Он отмечает, что, как правило, “размеры поверхности нагрева настолько больше свободно образующихся в непосредственной близости к ней пузырей и пленок, что возникновение кризиса в режиме парообразования равновероятно во всех точках этой поверхности”. “Идеальной моделью, полностью удовлетворяющей последнему условию, является весьма большая горизонтальная пластина, обращенная поверхностью нагрева вверх”. Зубер в [2] получил формулу для бесконечной плоскости, аналогичную формуле Кутателадзе, на основе физической модели, опирающейся на результаты анализа неустойчивостей Тейлора и Гельмгольца, рассмотрев переход к КТП со стороны переходного кипения. В его модели рассматривается уже сформировавшаяся паровая пленка на плоскости под слоем жидкости. Большая часть экспериментальных исследований КТП проведена в условиях кипения в большом объеме и это, видимо, основная причина, почему не наблюдались в двумерном случае (на плоскости) паровые столбы о которых говорится в теории Зубера [2]. При исследовании КТП на бесконечной плоскости отношение высоты слоя жидкости к наименьшему характерному размеру должно быть малым [3]. Паровые столбы наблюдались в [4] в горизонтальных слоях н-додекана со значениями высоты 2.5 и 4.0 мм, соответственно. В [5] показано, что распределение паровых столбов происходит в соответствии с выводами двумерной неустойчивости Рэлея – Тейлора [6] при подходе к кризису со стороны развитого пузырькового кипения. Также в [5] выполнен расчет КТП при подходе со стороны переходного кипения (задача Зубера), в предположении, что процесс происходит по сценарию [6].

В работе выполнено экспериментальное исследование развития кризиса пузырькового кипения в тонком горизонтальном слое диэлектрической жидкости HFE–7100 с начальной высотой 6 мм при атмосферном давлении.

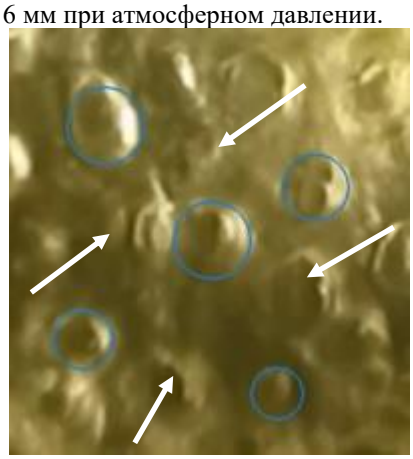


Рисунок 1. Переходное кипение при развитии кризиса пузырькового кипения: h = 6 мм, $q = 9.9\times10^4$ Вт/м^2, Δt = 33.7 К.

На рисунке 1 приведен фрагмент межфазной поверхности при переходном кипении в слое жидкости. На поверхности видны растущие пузырьки по углам четырехугольника, один пузырек расположен в центре. При разрушении пузырей образуются паровые столбы, они находятся между пузырями и показаны стрелками. Такая конфигурация паровых столбов получена в анализе двумерной неустойчивости Рэлея–Тейлора [6]. В данной работе иллюстрируется первое наблюдение этой неустойчивости в режиме переходного кипения. Также в работе приводятся результаты статистической обработки наблюдений и расчетов КТП.

Исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда (Грант № 23-19-00245)

Список литературы:

1. Кутателадзе С.С. Гидродинамическая теория изменения режима кипения жидкости при свободной конвекции // Изв. АН СССР Сер. техн. наук. 1951. № 4. С. 529-536.
2. Zuber N. On the stability of boiling heat transfer // Trans. ASME. 1958. V. 80. P. 711 – 720.
3. Theofanous T.G., Tu J.P., Dinh A.T., Dinh T.N. The boiling crisis phenomenon: Part II: dryout dynamics and burnout // Experimental Thermal and Fluid Science. 2002. V. 26. 793-810.
4. Zhukov V.I., Pavlenko A.N. Crisis of nucleate boiling in a finite-height horizontal layer of liquid // J. Engin. Thermophys. 2020. 29. P. 1–13.
5. Zhukov V.I., Pavlenko A.N. Symmetry of structures under two-dimensional instability in a finite-height horizontal layer of boiling liquid // Symmetry. 2023. V. 15. Iss. 9. Art. 1792.
6. Sernas V., Lienhard J.H., Dhir V.K. The Taylor wave configuration during boiling from a flat plate // Int. J. Heat Mass Transfer. 1973. V. 16. P. 1820-1821.

УДК 532.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЯЗКОСТИ НА ДИСПЕРСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПРЕЯ ДВУХКАНАЛЬНОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ ФОРСУНКИ

Лебедев А.С.[1], Лавронов К.Д.[1]

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

В настоящее время, важнейшим источником энергии является сжигание органического топлива. Современные энергетические установки и двигатели внутреннего сгорания совершенствуются десятки лет, однако с каждым годом, требования, связанные с экологической безопасностью, продолжают ужесточаться.

Известно, что эффективность сгорания спрея топлива, а следовательно, и доля вредоносных выбросов, зависит от площади поверхности капель. Одним из наиболее перспективных методов увеличения суммарной площади поверхности капель спрея является распыл эмульсий - смесей двух несмешивающихся жидкостей. В [1] продемонстрировано, что смесь дизельного топлива и воды, за счет испарения воды уменьшает температуру капли, что приводит к уменьшению образования углеродного остатка на 94%. В [2] приведено описание математической модели последовательно описывающей стадии роста пузырька из перегретой жидкости. В данной статье сделан вывод, что контроль процесса микровзрыва в спрее может быть использован для увеличения эффективности сгорания. В статье [3] приведено сравнение экспериментальных данных, полученных в ходе исследования процесса микровзрыва с математическим моделированием. В результате данной работы авторы приходят к выводу, что предложенная математическая модель согласовывается с экспериментом в пределах обозначенной погрешности.

Разработка математических моделей, позволяющих достоверно предсказывать поведение сложных турбулентных многофазных течений критическим образом зависит от наличия обширной экспериментальной базы. Экспериментальное подтверждение необходимо как для корректного замыкания математических моделей, так и для проверки корректности их работы в целом. В случае дисперсных струйных течений, на сегодняшний день в литературе присутствует обширный объем экспериментальных данных, например о дисперсных характеристиках спреев [4,5]. Однако, в литературе практически отсутствует информация о поведении спрея в случае подачи в форсунку эмульсии двух несмешивающихся жидкостей, или жидкостей с разной вязкостью. Расширение экспериментальной базы в этом направлении послужило мотивацией для проведения данного исследования.

Распыление производилось двухканальной центробежной форсункой с двумя независимыми каналами подачи рабочей жидкости. Внутри форсунка состоит из вихревой камеры диаметром 3,4 мм и высотой 1,69 мм. Камера конически сужается к выходному отверстию под углом 45° до выходного отверстия диаметром 0.9 мм.

На первом этапе экспериментального исследования изучалось распыление однокомпонентного спрея (спирт – спирт). Рабочая жидкость независимо подавалась на каждый канал форсунки, с расходом 1, 2 и 3 мл/с на канал, смешивалась внутри вихревой камеры и в виде спрея выпускалась из выходного канала форсунки. Локально-времяпролетным методом time-shift на базе устройства SpraySpy был проведен дисперсный анализ состава спрея в выбранном сечении. Регистрация капель проводилась на расстоянии 20 мм от среза сопла форсунки. Также была проведена теневая визуализация спрея с использованием скоростной камеры FASTCAM Photron NOVA S12, оборудованной увеличивающим объективом DistaMax Infinity K2.

На втором этапе исследования в качестве рабочей жидкости использовался водно-спиртовой раствор с добавлением пластификатора - гидроксиэтилцеллюлозы. Данное вещество позволяет значительно изменять кинематическую вязкость жидкости (от 2 до 100 раз) при низкой массовой концентрации пластификатора (0.01 - 0.5%) и практически без изменения значения плотности растворителя (спирта или воды). Жидкость с увеличенной вязкостью независимо подавалась на один из каналов форсунки. Было проведено исследование влияния вязкости жидкости на одном из каналов двухканальной форсунки, без изменения плотности жидкости.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 22-79-10246), и использовании методик, разрабатываемых в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

Список литературы:

1. Maiboom A., Tauzia X. NOx and PM emissions reduction on an automotive HSDI Diesel engine with water-in-diesel emulsion and EGR: An experimental study // Fuel. 2011. V. 90, No. 11. P. 3179–3192.
2. Shinjo J., Xia J., Ganippa L. C., Megaritis A. Physics of puffing and microexplosion of emulsion fuel droplets // Phys. Fluids. 2014. V. 26, No. 10. Art. 103302.
3. Antonov D. V., Fedorenko R. M., Strizhak P. A., Nissar Z., Sazhin S. S. Puffing/micro-explosion in composite fuel/water droplets heated in flames // Comb. Flame. 2021. V. 233. Art. 111599.
4. Naz M. Y., Sulaiman S. A., Ariwahjoedi B., Zilati. K. Visual characterization of heated water spray jet breakup induced by full cone spray nozzles // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 2015. V. 56, No. 2. P. 211–219.
5. Shadrin E. Yu., Anufriev I. S., Sharypov O. V. Atomization and combustion of coal-water slurry fuel sprayed by a pneumatic nozzle // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 2021. V. 62, No. 3. P. 490–495.

УДК 536.242

ОДНОФАЗНОЕ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЕ ОРОШЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Назаров А.Д., Миськив Н.Б., Серов А.Ф., Мамонов В.Н.

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

Эксперименты по охлаждению теплонагруженной поверхности капельным потоком проводились на испытательном стенде открытого типа при атмосферном давлении [1]. Поверхность теплообменника, расположенная вертикально, орошалась источником, установленным перпендикулярно к поверхности. В качестве охладителя использовалась дистиллированная вода температурой 19 ^{0}C ÷ 21 ^{0}C. Источником являлась гидравлическая полноконусная распылительная форсунка DD14.100 с диаметром выходного отверстия 1,2 мм, квадратным распылом с углом факела 60^0. Теплообменник был изготовлен из титановой фольги толщиной 50 мкм, с шероховатость поверхности (6 ÷ 8) мкм, размером 70 мм × 70 мм. Нагрев осуществлялся постоянным электрическим током от регулируемого источника с максимальными выходным параметрами тока 240 А и напряжения 80 В. Измерение температурного поля проводилось тепловизионной камерой ThermoTracer TH7102IR, позволяющей измерять температуру поверхности теплообменника с неопределенностью 2 %. Перепад давления на форсунке варьировался в диапазоне 98,07 kPa ÷ 392,26 kPa, что соответствовало массовому потоку от 1,89 кг·м$^{-2}$·с$^{-1}$ до 4,3 кг·м$^{-2}$·с$^{-1}$. Расстояние форсунки до поверхности, равное 125 мм, обеспечивало орошение всей площади теплообменника во всем диапазоне расходов.

По прямым измерения параметров потока форсунки DD14.100 с помощью специализированного прибора SpraySpy LabLine, средняя скорость потока, при увеличении перепада давления на форсунке, имела значения от 4,9 м·с$^{-1}$ до 7,6 м·с$^{-1}$, средний Заутеровский диаметр от 219,1 мкм до 156,7 мкм.

Плотность теплового потока определялась: $q = \frac{W}{S}$, W – полная мощность на нагревателе, S – площадь поверхности. Усредненный по площади коэффициент теплоотдачи определялся по формуле $h = \frac{q}{T_W - T_f}$, где T_w – среднее значение по поверхности теплообменника, T_f – температура набегающего потока. Данные по теплопередаче нормированы по безразмерным величинам

$$Nu = \frac{h \cdot L}{k},$$

и числа Рейнольдса потока

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot L}{\mu}.$$

За масштаб длины в определении чисел Нуссельта и Рейнольдса принимались длина L стороны квадратного нагревателя, ρ – плотность охладителя; k - коэффициент теплопроводности среды; μ – динамическая вязкость среды. За характеристическую скорость u принималась средняя скорость потока, измеренная специализированным прибором SpraySpy LabLine.

Проведено сравнение (см. рис.1), полученных экспериментальных данных, с корреляцией для режима без кипения, предложенной в работе [2].

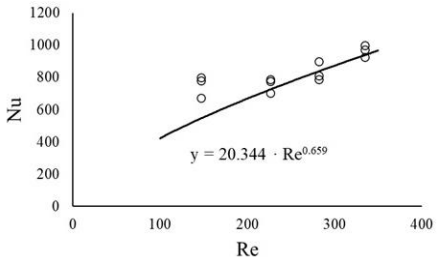


Рис. 1. Сравнение значений числа Нуссельта с корреляцией [2].

В исследовании [2] проанализирован коэффициент теплоотдачи от 9000 Вт·м$^{-2}$·К$^{-1}$ до 24000 Вт·м$^{-2}$·К$^{-1}$ к спрею десяти форсунок с скоростью в диапазоне от 16,8 м·с$^{-1}$ до 54,4 м·с$^{-1}$ и Заутеровским диаметром от 81,4 мкм до 149,2 мкм. Несмотря на то, что параметры распыления, а именно диаметр и скорость капель, изменяются, было обнаружено, что массовый поток является доминирующим фактором, влияющим на теплообмен.

Данные настоящего исследования также показывают, что при данных тепловых нагрузках, при использовании форсунки DD14.100, тепловой поток не зависти от скорости и диаметра капель в спрее. Несмотря на совершенно разные параметры спрейного потока форсунки DD14.100 и десяти форсунок в [2], условий орошения (в [2] – орошение сверху), формы и размера теплонагруженной поверхности, расстояния источника спрея до поверхности, экспериментальные точки совпадают с корреляцией достаточно хорошо. Основные результаты находятся в пределах ± 8.05 % корреляции. За исключением начальных точек. Отклонение этих точек объясняется большой неопределенностью при расчете коэффициента теплоотдачи h. Так как, в эту формулу входит разница температур $T_W - T_f$, а при небольшом тепловом потоке значения этих температур близкие, то небольшая неопределенность в измерении может приводить к ошибке.

Список литературы:

1. Vladyko I., Miskiv N., Serdyukov V., Nazarov A., Surtaev A. Influence of the Nozzle-to-Surface distance on spray cooling efficiency. Fluids. 2023. V. 8(7):191. 12 p.
2. Karwa Nitin, Kale Sunil R., Subbarao P.M.V. Experimental study of non-boiling heat transfer from a horizontal surface by water sprays. Experimental Thermal and Fluid Science. 2007. 32. P. 571–579.

УДК 535: 621.37

ПЛАЗМЕННАЯ ЭКРАНИРОВКА ПРИ НАНОСЕКУНДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ КРЕМНИЯ

Родионов А.А. [1], **Старинский С.В.**[1,2], **Шухов Ю.Г.** [1]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] 11635, Greece, Athens, Theoretical and Physical Chemistry Institute,
National Hellenic Research Foundation, 48 Vassileos Constantinou Ave

Пространственно модулированное лазерное излучение применяется для текстурирования поверхностей с целью достижения высокой скорости и точности обработки [1]. Особый интерес представляет модуляция фазы что позволяет формировать сложные интерференционные картины на поверхности материала для управления рельефом поверхности. Этот метод позволяет изменять физические и химические свойства поверхности материала на микро- и нанометровом уровне, что открывает новые возможности в различных областях науки. Энергия лазерного импульса является главным ограничением для данного метода обработки, поэтому перспективно применять наносекундные лазеры, которые, как правило, отличаются высокой энергией в импульсе.

Характерной особенностью наносекундного лазерного воздействия является возникновение плазменной экранировки в процессе взаимодействия с материалом [2]. Данный эффект оказывает существенной влияние как на процесс синтеза, так и на обработку материалов. Так, при обработке поверхностей с целью придания им экстремальных свойств смачивания, одним из ключевых параметров является плотность энергии лазерного излучения, достигающего поверхности [3]. Однако, из-за наличия плазменной экранировки, реальная плотность энергии может быть искажена, что требует коррекции при управлении процессом обработки и расчётах. Несмотря на длительное исследование плазменной экранировки, остается открытым вопрос о ее влиянии на модификацию материалов вблизи порога их абляции. Это не позволяет тонко контролировать процесс обработки.

В данной работе обработка производилась модулированным излучением Nd:YAG лазера на длине волны 532 нм и длительностью импульса на полуширине 8 нс. Проведена обработка монокристаллического кремния с целью придания супергидрофильных свойств смачивания. Обработка проводилась в четырех диапазонах плотностей энергии лазерного излучения: <1 Дж/см^2, 1-2 Дж/см^2, 3-6 Дж/см^2, >8 Дж/см^2. Исследование плазменной экранировки осуществлялось на примере сквозного сверления кремниевых пластин. Эффективность абляции оценивалась с помощью измерений числа импульсов, необходимых для пробития кремниевой мишени, в зависимости от плотности энергии лазерного излучения. Оценка лазерной экранировки проводилась путем регистрации лазерного излучения за каналом.

Проанализирована эффективность наносекундной лазерной абляции кремния в зависимости от давления фонового газа. Установлено критическое повышение эффективности абляции при снижении давления фонового газа с 20 до 2 Па. Обнаружено немонотонное поведение эффективности абляции в области близкой к порогу модификации материала (0,5 – 3 Дж/см^2), вызванное влиянием плазменной экранировки. Обнаружена корреляция эффективности лазерной абляции с режимами обработки кремния в условиях формирования супергидрофильных поверхностей. Выдвинута гипотеза о смене механизма уноса материала в области (0,5 – 3 Дж/см^2), что приводит к изменению морфологии поверхности с конусообразной, характерной для «черного кремния» [4] на развитую волнообразную [5].

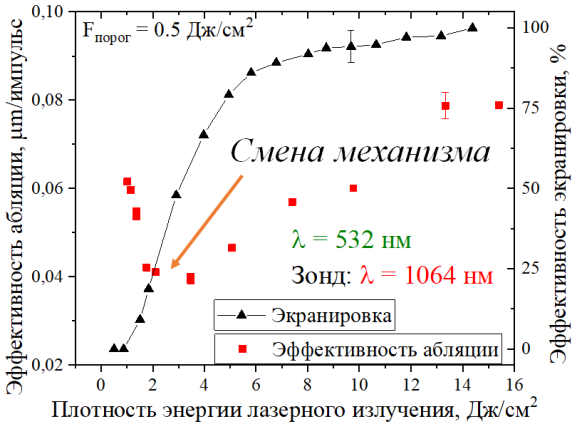


Рис. 1. Сопоставление графиков эффективности лазерной абляции при атмосферном давлении и плазменной экранировки.

Список литературы:

1. Kaakkunen J. J. J., Vanttaja I., Laakso P. Fast micromachining using spatial light modulator and galvanometer scanner with infrared pulsed nanosecond fiber laser //Journal of Laser Micro Nanoengineering. 2014. Т. 9. №. 1. С. 37.
2. Bulgakov A. V., Bulgakova N. M. Thermal model of pulsed laser ablation under the conditions of formation and heating of a radiation-absorbing plasma //Quantum Electronics. 1999. Т. 29. №. 5. С. 433.
3. Dolgaev S. I. et al. Formation of conical microstructures upon laser evaporation of solids //Applied Physics A. 2001. Т. 73. С. 177-181.
4. Zuev D. A. et al. Fabrication of black multicrystalline silicon surface by nanosecond laser ablation //Applied Physics B. 2011. Т. 105. С. 545-550.
5. Starinskiy S. V. et al. Formation of periodic superhydrophilic microstructures by infrared nanosecond laser processing of single-crystal silicon //Applied Surface Science. 2020. Т. 512. С. 145753.

Работа выполнена в рамках научного проекта под руководством ведущего ученого (мегагрант № 24-075-60426-1-0066-000049) Сажина С.С.

УДК 532.529

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ КАПЕЛЬ МАЛОГО РАЗМЕРА В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПОТОКАХ

Рябов М.Н.[1], Гобызов О.А.[1], Бильский А.В.[1]

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

Диспергирование жидкостей является критически важным процессом в задачах проектирования топливных форсунок, горелок для экологичной утилизации отходов в нефтяной и газодобывающей отраслях, оптимизации работы двигателей, и множестве других приложений. Процессы вторичного диспергирования жидкости, то есть дробления уже сформировавшихся капель, определяют конечный дисперсный состав капельной фазы и время, необходимое для её формирования – ключевые для большинства прикладных задач характеристики [1, 2]. Сложность процессов вторичного диспергирования объясняется многообразием явлений, проявляющихся в условиях скоростной и/или тепловой неравновесности капли с газовым потоком, таких как деформация капель, внутреннее движение жидкости, вязкостные и капиллярные эффекты. В научной литературе представлено большое количество исследований, посвященных данной теме, установлены основные механизмы и закономерности процессов. Тем не менее, ряд вопросов в рассматриваемой области остаются малоизученными, а необходимые для практического применения обобщения до сих пор выработаны лишь для ограниченного круга задач.

К настоящему моменту большинство имеющихся данных по взаимодействию капли с газовым потоком получены в экспериментах с однородными течениями или в квазистационарных потоках за проходящими ударными волнами. При этом отсутствуют систематические исследования поведения капель в практически важных до- и сверхзвуковых двухфазных струйных течениях, где капли подвергаются действию газового потока с резким изменением давления, плотности и скорости газа. Помимо этого, большинство представленных в литературе работ проведено для капель "естественного" размера (порядка 0,5 - 3 мм) [1]. Большой характерный размер капель предполагает, что при высокой скорости обтекания капли потоком газа) всегда реализуются также и большие числа Вебера (We>>100), определяющие режим её разрушения, а средние или низкие числа Вебера ассоциируются с медленным течением.

Таким образом, детально исследованной оказывается лишь часть возможных комбинаций параметров диспергирования, например комбинации чисел Вебера и Рейнольдса. Исследования, в которых делаются попытки выйти за стандартный диапазон параметров, достаточно редки, например, лишь в нескольких работах сочетание низких чисел Вебера и высокой скорости обтекания достигается за счёт высокой степени разрежения потока либо за счёт малого размера капель и высокой скорости течения газа [3], [4].

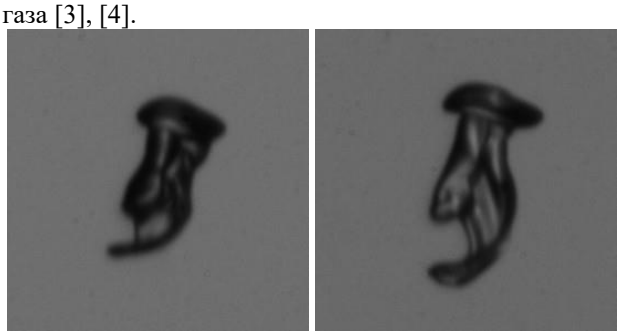


Рисунок 1. Стадии разрушения капли с характерным поперечным размером 66 мкм по механизму парашют в сверхзвуковом потоке (видимое поле 200 мкм, межкадровая задержка 2 мкс).

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования процессов деформации и разрушения капель малого (порядка 100 мкм) размера в высокоскоростном непрерывном потоке. При таких характеристиках газокапельного течения взаимодействие капель с потоком характеризуется средними и низкими числами Вебера и Рейнольдса. Дополнительной особенностью является то, что характерные длины волн неустойчивостей, развивающихся на поверхности капли, в таких условиях сравнимы с размерами самих капель, что также может оказывать влияние на характер их разрушения. В работе описывается методика проведения экспериментов, представлены и проанализированы результаты измерений и визуализации потоков газовой и жидкой фаз, а также распределения форм и размеров капель, определены характерные числа Вебера разрушения капель и описаны морфологические особенности разрушения.

Список литературы:

1. Guildenbecher, D.R.; López-Rivera, C.; Sojka, P.E. Secondary atomization //Exp. Fluids 2009, 46, с.371–402
2. Бойко В.М., Поплавский СВ. Динамика частиц и капель в потоке за ударной волной //Известия РАН. МЖГ, 2007, 3, с.110120
3. Theofanous, T.G.; Li, G.J.; Dinh, T.N. Aerobreakup in rarefied supersonic gas flows //J. Fluids Eng. Trans. ASME2004, 2004, 126, с.516–520,
4. Gobyzov, O. A., M. N. Ryabov, and A. V. Bilsky, 2020, Study of Deformation and Breakup of Submillimeter Droplets Spray in a
Supersonic Nozzle Flow// Applied Sciences, 10(18), с. 6149

УДК 536.242

ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ БИФИЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ПРОЦЕССЫ САМООРГАНИЗАЦИИ КОЛЛОИДНЫХ ЧАСТИЦ ПРИ ИСПАРЕНИИ КАПЛИ НАНОЖИДКОСТИ

Старинская Е.М., Миськив Н.Б., Родионов А.А., Старинский С.В.
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Динамика испарения капель коллоидных растворов – важный процесс, применяющийся в различных приложениях, таких как окраска, струйная печать, изготовление упорядоченных микроэлектронных структур и т.д. [1]. Понимание динамики испарения капель наножидкостей очень важно для контроля и достижения желаемых форм осаждения [2,3]. Добиться желаемой структуры отложений коллоидных капель весьма затруднительно, поскольку в динамику испарения и осаждения коллоидных жидкостей вовлечено множество сложных физических явлений [2]. Например, хорошо известен эффект организации частиц в виде "кофейного кольца", когда коллоидные частицы скапливаются на линии контакта трех фаз (твердое тело, жидкость, воздух), оставляя кольцеобразные узоры во время испарения и тем самым нарушая формирование однородной структуры осадка [3]. Кроме того, потоки Марангони, колебания температуры и гравитационные эффекты могут изменять физические явления, управляющие динамикой испарения и осаждения коллоидных жидкостей.

Так, на наклонной поверхности круглые капли становятся асимметричными, а большая часть их объема смещается в направлении наклона вниз. Естественно, возникает вопрос, как деформация капель под действием силы тяжести влияет на скорость испарения и формирование осаждений. Ответ на этот вопрос представляет не только общий интерес с фундаментальной точки зрения, но и имеет большое значение для реальных приложений, связанных с формированием осаждений при испарении капель наножидкостей [4]. В настоящее время влияние размера и типа наночастиц, а также угла наклона поверхности на степень асимметрии в пространственном распределении частиц слабо изучено, поэтому является предметом исследования настоящей работы.

В данной работе было проведено исследование влияния пространственной ориентации бифильной поверхности на осаждение коллоидных частиц при испарении капли наножидкости с различными типами наночастиц. В нашем исследовании были использованы уникальные сложно-структурированные поверхности (бифильные) с контрастными смачивающими свойствами. Благодаря особой технологии создания такие поверхности позволяют проводить эксперименты по испарению капель, варьируя ориентацию поверхности в пространстве.

Экспериментальный стенд представляет собой медную пластину, закрепленную на двух опорах. Как можно видеть из рисунка 1, конструкция стенда позволяет менять угол поворота поверхности. Данная установка расположена в закрытом коробе, за счет которого вокруг капли сохраняются стабильные условия. Короб оснащен оптически и ИК-прозрачными стеклами. Температура и влажность вокруг капли измерялись гигрометром AZ Instrument model 872 с неопределенностью ±4%.

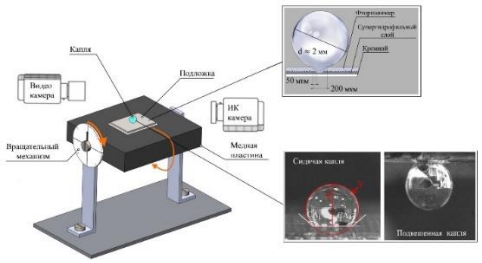


Рисунок 1. Схема экспериментального стенда.

В рамках данного исследования рассматривались два типа наножидкости: первый – с наночастицами диоксида кремния (SiO_2) концентрацией 0,1 wt % и размером наночастиц 12 нм; второй – с наночастицами оксида железа (Fe_3O_4) концентрацией 0,1 wt % и размером наночастиц 20 нм. В обоих случаях базовой жидкостью была дистиллированная вода. Приготовленные коллоидные растворы испарялись на бифильной поверхности под различными углами относительно гравитационных сил. Изменения формы капли и ее температуры в процессе испарения фиксировались с помощью цифровой камеры Baumer vcxg-04m и тепловизионной камеры NEC TH7102IR с использованием макрообъектива TH 71-377. После полного высыхания капель с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) был проведен анализ структуры отложения наночастиц в зависимости от ориентации поверхности относительно гравитационных сил.

В результате проведенного исследования было определено влияние наклона поверхности на динамику испарения и осаждения коллоидных капель. Визуализация полученного распределения частиц позволяет предположить, что асимметричная ширина осадка обусловлена гравитационным воздействием, а также сильно зависит от типа наночастиц.

Список литературы:

1. Singh M., Haverinen H.M., Dhagat P., Jabbour G.E. (2010) Inkjet printing-process and its applications. Advanced Materials, 6(22), p. 673–685. DOI:10.1002/adma.200901141.
2. Kim J.Y., Gonçalves M., Jung N., Kim H., Weon B.M. (2021). Evaporation and deposition of inclined colloidal droplets. Scientific Reports, 11(1), 17784, p. 1–9. DOI:10.1038/s41598-021-97256-w.
3. Rashidi S., Mahian O., Languri E.M. (2018) Applications of nanofluids in condensing and evaporating systems: A review. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 3(131), p. 2027–2039. DOI:10.1007/s10973-017-6773-7.
4. Timm M.L., Dehdashti E., Darban A.J., Masoud H. (2019) Evaporation of a sessile droplet on a slope. Scientific Reports, p. 1–13. DOI:10.1038/s41598-019-55040-x.

УДК 532.5

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА ЖИДКОСТЕЙ ОТ НЕРЕГЛАМЕНТИРОВАННЫХ ПРИМЕСЕЙ

Антонов Д.В.[1], Стрижак П.А.[1]

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

Рост объемов промышленных производств сопровождается выработкой технологических и сточных вод, что негативно сказывается на экологической обстановке и требует совершенствования существующих методов очистки жидкостей [1, 2]. Очистка технологических и сточных вод (рис. 1), как правило, реализуется в несколько этапов: многоступенчатая фильтрация, химическая нейтрализация примесей, термическая (высокотемпературная) очистка [3]. Высокотемпературные методы очистки включают выпаривание (концентрирование примесей), сушку (распыление жидкости в среде горячего воздуха или дымовых газов), термическое окисление (выжигание горючих примесей). Выжигание применяется для обезвреживания органических примесей сточных вод. Для очистки минерализованных вод чаще всего используется выпаривание и адиабатное испарение. Процесс удаления минеральных веществ из воды может быть проведен в две стадии: концентрирование и выделение сухих веществ. Выделение сухого продукта может происходить, например, в распылительной сушилке. Нередко вторую стадию заменяют захоронением концентрированных растворов. Выбор метода (рис. 1) зависит от объема сточных вод, их состава, теплотворной способности, коррозионной активности, экономичности процесса, требований, предъявляемых к очищенным водам [4, 5].

Рис. 1. Типичный пример сброса технологических и сточных вод.

Причиной ограниченной применимости термических методов очистки жидкости до настоящего времени заключается в дороговизне и энергоемкости, поскольку требуется достаточно много энергии на интенсификацию фазовых переходов и окислительных реакций. В настоящее время термическую очистку применяют для обезвреживания небольших количеств концентрированных сточных вод. В рамках данной работы предлагаются способы снижения энергоемкости и материальных расходов на проведение термической очистки за счет оптимизации распыления жидкости с учетом возможностей реакторов, состава жидкости, тепловых условий, интенсификации вторичного измельчения капель по комбинированным методикам, применения избыточного сбрасываемого тепла на станциях, применения суспензионных и эмульгированных топлив из отходов и экологичных добавок, создания систем замкнутого цикла с использованием очищаемой жидкости в качестве рабочего тела и теплообменного агента, а также компонента топлива.

Сформулированы практические рекомендации для обеспечения условий термической очистки жидкостей от твердых примесей. Ключевая концептция подхода представлена на рис. 2. Установленные закономерности эффектов вторичной фрагментации являются альтернативой известным способам очистки технологических и сточных вод.

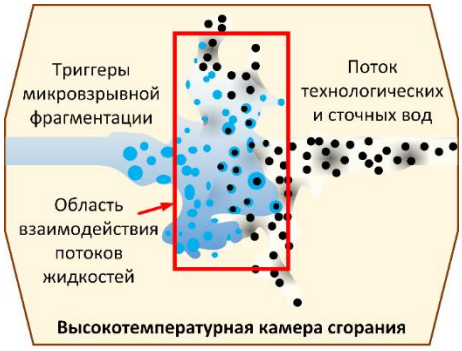


Рис. 2. Ключевая концепция использования вторичной фрагментации при термической очистке жидкостей от нерегламентированных примесей.

Список литературы:

1. Zyoud A.H., Zyoud S.H., Amireh A. An innovative and sustainable approach for water purification: Thermal decomposition of tetracycline contaminant adsorbed on thermally stable montmorillonite // Case Stud. Chem. Environ. Eng. 2024. V. 9. 100631.
2. Zhang X., Liu J., Li W., Li C., Jiao F.-Z., Yu Z.Z., Li X. Three-dimensional disposable wooden chopsticks-derived solar-thermal evaporators for environmental energy-enhanced water evaporation and purification // Compos. Commun. 2023. V. 44. 101746.
3. Qasim M., Rafique M.S., Naz R. Water purification by ozone generator employing non-thermal plasma // Mater. Chem. Phys. 2022. V. 291. 126442.
4. Liu Z., Wang T., Wang D., Mi Z. Regulating the morphology of nanofiltration membrane by thermally induced inorganic salt crystals for efficient water purification // J. Membr. Sci. 2021. V. 617. 118645.
5. Ha D.W., Kwon J.M., Baik S.K., Lee Y.J., Han K.S., Ko R.K., Sohn M.H., Seong K.C. Purification of condenser water in thermal power station by superconducting magnetic separation // Phys. C: Supercond. Appl. 2011. V. 471. P. 1530-1532.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (РНФ 23-69-10006, https://rscf.ru/project/ 23-69-10006/)

УДК 536.46

ПРИМЕНЕНИЕ ПЛИФ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПЛАМЕНИ: МЕТОДОЛОГИЯ И АНАЛИЗ ДАННЫХ

Толстогузов Р.В.[1], Шараборин Д.К.[1], Савитский А.Г.[1], Пономарев А.А.[1], Дулин В.М.[1]
[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Исследование сложных процессов в турбулентных, часто нестационарных трёхмерных потоках стало возможным благодаря использованию передовых оптических методов диагностики. Такие методы обеспечивают возможность одновременных измерений скоростных, температурных и концентрационных параметров, что в свою очередь способствует глубокому пониманию процессов теплообмена и характеристик химических реакций. Получаемая в ходе таких исследований база экспериментальной информации критически важна при усовершенствовании конструкций горелочных устройств и камер сгорания, в частности, для повышения их эффективности и уменьшения уровня вредных выбросов [1, 2]. Основополагающее значение в физико-химических процессах, протекающих внутри комплексно устроенных горелок, придаётся тепловым характеристикам. Постоянно пополняется обширная база данных экспериментальных исследований, которая содержит информацию о пространственном распределении компонентов смеси, положении фронта пламени, областях максимального тепловыделения и температуре продуктов горения. Особая ценность придаётся данным, полученных при помощи бесконтактных оптических методов, позволяющих фиксировать мгновенные двумерные распределения интересующих параметров, используемых для анализа процессов горения.

Цели работы: проведение серии экспериментальных исследований по оценке поля температуры в пламени Бунзена с помощью оптических методов (основанных на плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции – ПЛИФ), определение оптимальных условий проведения эксперимента и параметров обработки данных. Результаты, полученные в ходе работы, представляют собой важный ресурс для изучения физико-химических характеристик процессов горения, совершенствования техник оптической диагностики, а также для верификации численных моделей и аналитических методов, предназначенных для изучения систем с горением.

Для оценки поля температуры был использован метод ПЛИФ при возбуждении молекул OH. Измерения температуры методом ПЛИФ основаны на регистрации изображений интенсивности флуоресценции молекул, возбужденных в более высокое энергетическое состояние с помощью лазерного излучения. В работе был использован метод «Two-line» ПЛИФ и метод «Thermally-assisted» ПЛИФ (метод термической активации) [3, 4, 5]. Для этих двух методов измеряется интенсивность флюоресценции в возбужденном состоянии, но первый метод связывает флюоресценцию с температурой через распределение Больцмана заселенностей основного состояния, а второй связывает распределение возбужденных квантовых состояний с температурой [5].

Экспериментальный стенд включал в себя профилированное осесимметричное сужающееся сопло (внутренний диаметр d = 15 мм), в которое подавалась предварительно перемешанная смесь воздуха с различными видами топлива: метан, пропан, этилен. Коэффициент избытка топлива варьировался в диапазоне от 0.7 до 1, число Рейнольдса Re = 700 – 1500. Регистрация сигнала флуоресценции OH проводилась с использованием цифровых камер с ЭОП, оснащенных кварцевыми объективами и оптическими фильтрами. Возбуждение флуоресценции производилось с использованием импульсных лазеров накачки и перестраиваемых лазеров на красителях.

В результате работы были получены оценки поля температуры методами «Two-line» и «Thermally-assisted» ПЛИФ, а также поля температуры, полученные с использованием трехмерного прямого численного моделирования, выполненное с помощью ПО OpenFOAM. В работе представлено детальное описание эксперимента и применения методов ПЛИФ, рассмотрены основные сложности интерпретации полученных результатов, обработки данных, обозначены основные лимитирующие факторы применимости и преимущества методов. Проведена апробация методик оценки поля температуры, проведено сравнение результатов измерений с литературными данными, с результатами, полученными контактными методами измерения температуры и с результатами, полученными с помощью методов численного моделирования. В ходе работы было установлено, что измерения поля температуры с помощью двух методов ПЛИФ хорошо согласуются между собой с СКО ~ 75 K, а также со значениями температуры, полученными в результате численного моделирования.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

Список литературы:

1. Bouras F. Numerical study of turbulent structures for lean premixed prevaporized combustion // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2014. V. 55, No 4. P. 614–626.
2. Veselov K.E., Evdokimov O.A. Gas dynamics and liquid fuel combustion in a model combustor // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2023. V. 64, No 2. P. 266–278.
3. Cattolica R.J. OH rotational temperature from two-line laser-excited fluorescence // Applied Optics. 1981. V. 20, No 7. P. 1156–1166.
4. Lobasov A.S., Tolstoguzov R.V., Sharaborin D.K., Chikishev L.M., Dulin V.M. On the efficiency of using different excitation lines of (1–0) two-line OH fluorescence for planar thermometry // Thermophysics and Aeromechanics. 2021. V. 28. P. 751–755.
5. Dulin V.M., Sharaborin D.K., Tolstoguzov R.V. Assessment of single-shot temperature measurements by thermally-assisted OH PLIF using excitation in the A2ς+-X2Π (1-0) band // Proceedings of the Combustion Institute. 2021. V. 38, № 1. P. 1877–1883.

УДК 536.248.2

ИК-ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ КИПЕНИЯ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЛОЕ HFE-7100 НА МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Швецов Д.А., Павленко А.Н., Жуков В.И., Назаров А.Д., Михайлов А.В.
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Кипение является наиболее эффективным способом отвода тепла от теплоотдающей поверхности из-за способности фазового перехода жидкость-пар отводить высокие тепловые потоки при низкой разнице температур между нагретой поверхностью и жидкостью. В настоящее время процесс кипения диэлектрических жидкостей активно изучается как способ охлаждения силового электрооборудования и микроэлектроники.

Эффективным исследовательским инструментом, позволяющим детально визуализировать процессы кипения, является инфракрасная (ИК) термография с высокоскоростной съемкой [1]. Изучение распределения температур по поверхности нагрева, скорости роста пузырей, частоты зародышеобразования, динамики развития переходных процессов и кризисных явлений при кипении диэлектрических жидкостей дает возможность установить закономерности, влияющие на интенсификацию теплообмена и величину критического теплового потока.

В данной работе приводятся результаты экспериментального исследования теплообмена в горизонтальном слое диэлектрической жидкости HFE–7100 при давлении 50 кПа (T_s = 41 °C) на капиллярно-пористых покрытиях с различной теплопроводностью и поверхности без покрытий. Покрытия наносилось на днище специально изготовленной камеры с использованием аддитивной технологии 3D-печати методом SLM/SLS (селективного лазерного плавления/спекания). Подробно экспериментальный стенд, методика измерения и технология нанесения покрытия описана в работах [2, 3].

Поле температуры на теплоотдающей поверхности измерялось тепловизором FLIR x6530sc. Он способен регистрировать излучение с длиной волны от 1.5 мкм до 5.1 мкм. Съемка проводилась при частоте кадров 250 Гц и размере кадра 320x256 пикселей. Значения поля температур были откалиброваны по усредненным во времени и по пространству показаниям трех термопар на теплоотдающей поверхности с учетом результатов проведенного анализа по ИК-спектрам поглощения HFE–7100.

В работе представлены экспериментальные зависимости скорости роста пузырей и приводятся поля температур на различных теплоотдающих поверхностях при кипении в слое HFE–7100. Установлено, что на поверхности без покрытий пузыри образуются хаотично по поверхности нагрева, а на покрытиях пузыри образуются преимущественно вдоль впадин между гребней покрытий (рис. 1). Температура в зоне впадин между гребней и температура на вершинах гребней, например, для покрытия из нержавеющей стали отличается на ~ (0.5–0.6) °C за счет образования микропузырей.

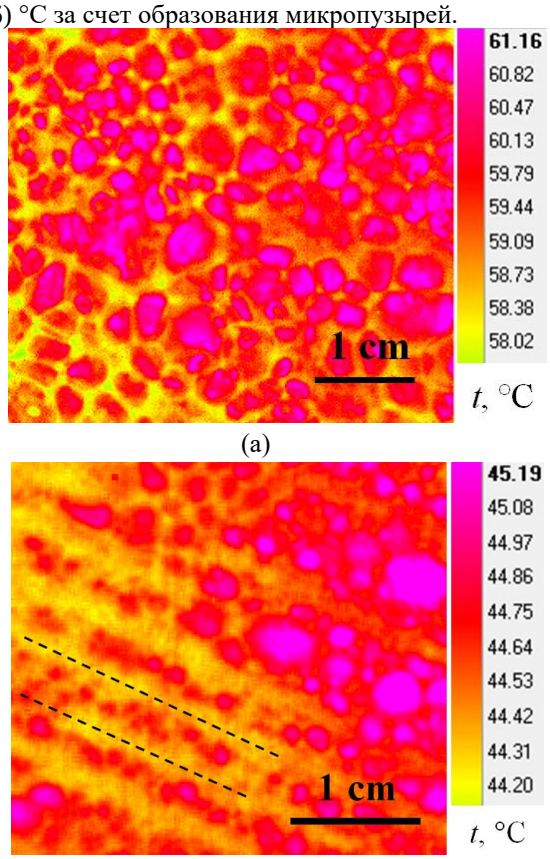


Рис. 1. Поля температур при кипении в слое HFE–7100 высотой 2.5 мм при давлении 50 кПа: (а) – поверхность без покрытий q = 11.3 кВт/м^2, $T_w - T_s$ = 19.1 K; (б) – 2D-модулированное капиллярно-пористое покрытие из нержавеющей стали q = 12.2 кВт/м^2, $T_w - T_s$ = 4.3 K. Пунктирными линиями обозначены вершины гребней покрытия.

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 23-19-00245).

Список литературы:

1. Vu N.T., Huang Y., Weibel J. A. High-speed visualization and infrared thermography of pool boiling on surfaces having differing dynamic wettability // Int. J. Heat Mass Transfer. 2024. V. 221. P. 125105.
2. Zhukov V.I., Pavlenko A.N., Shvetsov D.A. The effect of pressure on heat transfer at evaporation/boiling in horizontal liquid layers of various heights on a microstructured surface produced by 3D laser printing // Int. J. Heat Mass Transfer. 2020. V. 163. P. 120488.
3. Бессмельцев В.П., Павленко А.Н., Жуков В.И. Разработка технологии создания структурированных капиллярно-пористых покрытий методом 3D-печати для интенсификации теплообмена при кипении // Автометрия. 2019. Т. 55, №. 6. С. 25–35.

Секция: В.И. Терехов

Вихревая интенсификация теплообмена. Неоконченная история

Исаев С.А.

УДК 536.2

МАССОПЕРЕНОС В ЛОКАЛЬНОЙ РАБОЧЕЙ ЗОНЕ С ГАЗОВЫМ ИНФРАКРАСНЫМ ИЗЛУЧАТЕЛЕМ И СИСТЕМОЙ ВОЗДУХООБМЕНА ПРИ НАЛИЧИИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ИСТОЧНИКА АНТРОПОГЕННОГО ГАЗА.

Борисов Б.В., Кузнецов Г.В., Максимов В.И., Нагорнова Т.А., Салагаев С.О., Салихов Ф.Ю.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

e-mail: elf@tpu.ru

Применение в промышленных помещениях достаточно современных и экономичных систем поддержания регламентных температур, таких как газовый инфракрасный излучатель (ГИИ), сопряжено с рядом проблем [1]. Например, работа ГИИ светлого типа вследствие открытого горения газа приводит к выбросам продуктов сгорания (в основном CO2, H2O) в окружающую среду [1]. В дополнение к этому в производственном помещении есть дополнительные источники загрязнения воздуха, вследствие чего целесообразным становится установка в помещении системы принудительного воздухообмена. Поэтому при формировании регламентных условий в локальной рабочей зоне руководствуются соответствующими нормами и правилами, в соответствии с которыми важным определяющим фактором является не только температура, влажность и скорость перемещения воздуха, но и его загрязненность [2]. Контроль концентраций углекислого газа в локальной рабочей зоне является весьма актуальной задачей.

Теоретический анализ процессов массопереноса проводился путем численного моделирования. Задача решена в плоской постановке для области, схематично представленной на рис. 1.

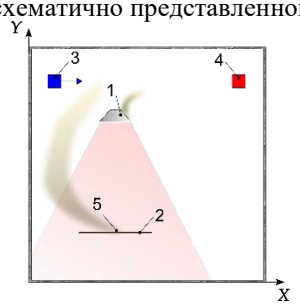


Рисунок 1 – Схема области решения: 1 – газовый инфракрасный излучатель, 2 – источник антропогенного газа, 3, 4 – области притока и оттока воздуха системы воздухообмена, соответсвенно,5 – горизонтальная панель, имитирующая оборудование.

Математическое моделирование конвективно-кондуктивного переноса теплоты и массы в области решения задачи проведено с использованием расчетных модулей пакета COMSOL Multiphysics: «The Heat Transfer I Fluids Interface», «The Turbulent Flow, k-ε Interface», модуля «Transport of Concentrated Species». Параметры радиационного теплового потока, особенно важного при моделировании работы ГИИ, вычислялись модулем «Surface-to-Surface Radiation» в рамках зональной модели по средним угловым коэффициентам [3].

Основные параметры помещения и ГИИ принимались аналогичными использованным в предыдущих исследованиях авторов, например, [1] и соответствовали реальным объектам.

Как показывает анализ результатов численного моделирования квазистационарная гидродинамическая картина течения устанавливается примерно к 40-60 минутам от начала работы системы нагрева и во многом определяется параметрами работы систем создания регламентных условий и воздухообмена.

Установлено, что выделяемый из локального источника загрязнения антропогенный газ вследствие сформировавшихся циркуляционных течений в помещении перемещается из локальной рабочей зоны в левую часть помещения, а затем проходя вдоль левой стены устремляется вверх, где выводится из помещения через канал отвода воздуха системы воздухообмена (рис. 2). Также проведён сравнительный анализ распространения антропогенного газа в помещении в зависимости от интенсивности локального источника газовыделения и различной интенсивности источников тепловой энергии, используемых при создании регламентных условий для работающего персонала. Особое внимание уделено анализу формирования микроклимата в локальных рабочих зонах. На основании обобщения полученных результатов сформулированы предложения для практики проектирования систем формирования регламентного режима локальных рабочих зон.

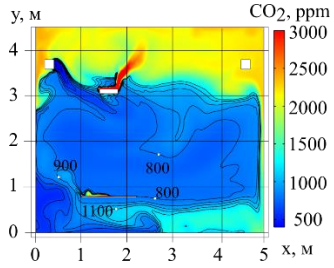


Рисунок 2 – Поле концентрации CO_2, сформированное к 60 минуте работы ГИИ.

Список литературы

1. Maksimov V.I., Nagornova T.A., Kurilenko N.I., Voloshko I.V. Heat transfer under conditions of operation of a gas infrared emitter and an air exchange system // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. 2021. Vol. 332. № 9. P. 128-141.
2. ГОСТ Р 59972-2021 Системы вентиляции и кондиционирования воздуха общественных зданий.
3. Russell, J. Comsol Multiphysics / J. Russell, R. Cohn. – Scotland, United Kingdom: Lennex Corp, 2012. 79 p.

Работа поддержана РНФ (грант № 20-19-00226 П).

УДК 536.24: 612.55

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО КОМФОРТА В СИСТЕМЕ «ЧЕЛОВЕК-ЗАЩИТНАЯ ОБОЛОЧКА-ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА»

Чорный А.Д.[1]

[1] Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси,
220072, Беларусь, Минск, ул. П.Бровки, 15

Сложное поведение теплофизических процессов в системе «человек-защитная оболочка-окружающая среда» (Ч-ЗО-ОС) с рассмотрением одежды как защитной оболочки вызвано наличием как тепловых, так и динамических воздействий окружающей среды (температура и влажность воздуха, скорость ветра, атмосферные осадки и т. д.), тепловлагосопротивления оболочки, а также тепловых потоков и потоков влаги к поверхности тела за счет функционирования системы внутренней терморегуляции человека [1]. Значимыми внешними факторами, влияющими на тепловое состояние, относятся температура воздуха, его относительная влажность, скорость движения, давление и состав, тепловое излучение как тела человека и его одежды, так и окружающих предметов, величина которых задает влияние внешних воздействий на человека. Показателями функционального состояния человека, обеспечивающими дозирование и контроль применения факторов, вызывающих изменение терморегуляции человека с ЗО (одеждой), являются показатели теплового комфорта. Контрольными параметрами для определения его условий является температура тела, температура кожи, влагопотери, теплоотдача в окружающую среду за счет испарения и т.д. В зависимости от их изменения происходит включение управляющих механизмов терморегуляции (потоотделение, дрожание, изменение метаболизма и интенсивности кровотока). Поэтому аналитическое описание и физико-математическое моделирование тепловлагопереноса в системе Ч-ЗО-ОС производиться с расчетом внутреннего состояния тела человека при учете наличия ЗО (одежды) как прослойки между окружающей средой и поверхностью кожи.

В настоящей работе метод построения модели тепловлагопереноса в системе Ч-ЗО-ОС базируется на компартментном подходе [2] (Рис. 1). В этом случае человеческое тело представляется набором $N \times K$ элементов со специальным компартментом системы кровообращения, а также компартментом ЗО (одежда), а в основе физико-математической модели лежит биотепловое уравнение и представление процесса терморегуляции человека как активной системы. Эта модель связана с моделью тепловлагопереноса от поверхности кожи человека в материал ЗО с возможностью прогнозирования в нем локальной температуры, объемной доли связанной воды и водяного пара.

Модель терморегуляции человека апробирована для прогнозирования физиологических показателей человека с ЗО (одеждой) при выполнении им конкретной задачи в определенных условиях окружающей среды (термонейтральность, различные уровни активности) (Рис. 2). Дополнительно проведен расчет тепловлагопереноса в пакетах материалов различного типа, составляющих ЗО (шерсть, хлопок, нейлон, полиэстер, шелк и их композиции). Результаты расчетов сравнивались с доступными данными и получено их удовлетворительное согласование, что позволяет использовать обобщенную модель тепловлагопереноса в системе «человек-защитная оболочка-окружающая среда» (Ч-ЗО-ОС) для теоретического установления свойств проектируемых ЗО, а также установления режимов теплового комфорта человека.

Рис. 1. Компартментный подход для модели терморегуляции человека

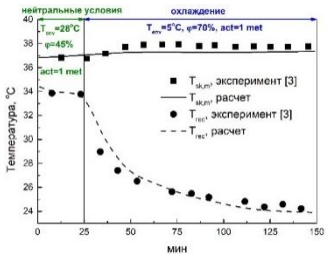


Рис. 2. Расчетная и экспериментальная средняя температура кожи и ректальной температуры при охлаждении [3]

Полученные результаты использованы для прогнозирования степени теплового комфорта / дискомфорта спасателя в специальной защитной одежде при проведении аварийно-спасательных работ в различных температурных условиях, а также определения режимов безопасной работы с оценкой степени локальной деструкции кожи (степени ожога).

Список литературы:

1. Parsons, K. Human Thermal Environments: the Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance / K. Parsons. London: Taylor & Francis, 2003. 560 p.
2. Katic K., Li R., Zeiler W. Thermophysiological models and their applications: A review // Building and Environment. 2016. V. 106. P. 286-300.
3. Stolwijk J.A.J., Hardy J.D. Partitional calorimetric studies of responses of man to thermal transients // J. Appl. Physiol. 1966. V. 21. P. 967-977.

УДК 536.24

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ГАЗОКАПЕЛЬНОМ ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКЕ В ТРУБЕ

Пахомов М.А., Терехов В.И.

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

Закрутка двухфазного потока является эффективным методом управления структурой и тепломассопереносом в потоке [1–3]. Наличие рециркуляционного течения, вызванного внезапным расширением, оказывает заметное влияние на интенсивность процессов переноса и распространение дисперсной фазы и в значительной мере определяет структуру отрывного двухфазного течения [4]. Закрученные двухфазные течения при отсутствии и наличии внезапного расширения трубы широко используются при стабилизации процесса горения в промышленных горелочных устройствах и в сепараторах. Взаимодействие между мелкими частицами и турбулентными вихрями газовой фазы − сложный и к настоящему времени не до конца изученный процесс.

Целью данной работы было выполнение численного моделирования влияния закрутки потока на распределение дисперсной фазы, структуру течения и интенсификацию теплопереноса в газокапельном течении в трубе.

Рассмотрена задача о динамике двухфазного закрученного турбулентного газокапельного потока при наличии теплообмена со стенками канала. При решении используется система осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS) уравнений с учетом обратного влияния частиц на процессы переноса в газе. Объемная концентрация дисперсной фазы мала ($\Phi_1 \leq 2\times10^{-4}$). Капли достаточно мелкие (d_1 < 100 мкм), поэтому можно пренебречь эффектами их столкновений друг с другом.

Выполнено численное моделирование влияния параметра закрутки потока на структуру турбулентного течения и теплообмен в закрученном газокапельном потоке с использованием эйлерова подхода при значениях параметра закрутки течения S = 0–0.75. Газовая фаза описывается системой трехмерных RANS уравнений с учетом обратного влияния частиц на процессы переноса в газе [5,6]. Турбулентность газовой фазы рассчитывается по модели переноса рейнольдсовых напряжений [7] с учетом влияния дисперсной фазы на турбулентные характеристики. Ранее автором было выполнено численное моделирование течения и теплообмена в газокапельном закрученном потоке после внезапного расширения трубы при испарении капель воды [5,6] и при испарении капель других жидкостей (этанол и ацетон) [8].

Для закрученного газокапельного потока характерным является рост концентрации мелких частиц на оси трубы за счет их накопления в зоне обратных токов и действия сил инерции и турбофореза при S > 0.4. Пристенная часть канала (r/R > 0.9) оказывается практически свободной от частиц за счет их интенсивного процесса испарения и уноса из этой области трубы. В газокапельном потоке при отсутствии закрутки наблюдается быстрая дисперсия капель по сечению трубы. Закрутка двухфазного потока с испаряющимися каплями жидкости приводит к увеличению уровня турбулентности несущей фазы (до 25%). При этом добавление дисперсной фазы вызывает подавление уровня турбулентности (до 15%). Показано, что добавление капель приводит к существенному росту теплообмена (более 1.75 раз) в сравнении с однофазным закрученным течением в трубе. При возрастании массовой концентрации капель (M_{L1} = 0.1) происходит значительное усиление тепломассообменных процессов в двухфазном потоке (до 3-х раз), с соответствующим ростом доли теплоты, расходуемой на фазовый переход и на теплообмен, при непосредственном контакте капель со стенкой. При этом трение на стенке возрастет незначительно (до 5%). Увеличение начального диаметра капель (d_1 = 100 мкм) вызывает существенное уменьшение интенсивности теплообмена между поверхностью трубы и газокапельным закрученным потоком (до 1.5 раз), в то время как увеличение трения на стенке несущественно (до 8%).

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 24-19-00358.

Список литературы:

1. Кутателадзе С.С., Волчков Э.П., Терехов В.И. Аэродинамика и тепломассообмен в ограниченных вихревых потоках. Новосибирск: Изд-во ИТ СО АН СССР. 1987. 282 с.
2. Щукин В.К., Халатов А.А. Теплообмен, массообмен и гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах. М.: Машиностроение. 1982. 200 с.
3. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки. М.: Мир. 1987. 588 с.
4. M. Sanjose, J.M. Senoner, Jaegle F., B. Cuenot, S. Moreau, T. Poinsot Fuel injection model for Euler–Euler and Euler–Lagrange large-eddy simulations of an evaporating spray inside an aeronautical combustor // Int. J. Multiphase Flow. 2011. V. 37. P. 514–529.
5. M.A. Pakhomov, V.I. Terekhov. Numerical modeling of turbulent flow structure and heat transfer in a droplet-laden swirling flow in a pipe with a sudden expansion // Numerical Heat Transfer, Pt A. 2017. V. 71. P. 721–736.
6. Пахомов М.А., Терехов В.И. Влияние испарения капель на структуру течения и тепломассообмен в ограниченном закрученном газокапельном потоке за его внезапным расширением // Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25. № 6. С. 865–875.
7. A. Fadai-Ghotbi, R. Manceau, J. Boree. Revisiting URANS computations of the backward-facing step flow using second moment closures. Influence of the numerics // Flow, Turbulence Combust. 2008. V. 81. P. 395–410.
8. Pakhomov M.A., Terekhov V.I. The effect of droplets thermophysical properties on turbulent heat transfer in a swirling separated mist flow // Int. J. Thermal Sci. 2020. V. 149. Paper 106180.

УДК 621.9

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛО И МАССООБМЕНА В ПРИСТЕННЫХ ПОТОКАХ С ФАЗОВЫМИ И ХИМИЧЕСКИМИ ПРЕВРАЩЕНИЯМИ

Лукашов В.В.

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

Среди всего многообразия задач конвективного тепломассообмена в системах переменного состава можно выделить отдельную группу процессов, для которых возможно предложить общую методику описания таких явлений [1-3]. Существует ряд научно- технических проблем достаточно разнообразных по своим сферами применения и особенностям организации течений. Например, таких как испарение (или конденсация) жидкости в пограничном слое при обтекании пористой непрерывно увлажняемой поверхности потоком другого вещества [4]. Выгорание покрытия стенок газовых каналов [5]. Сегодня многие технологии нанесения различных функциональных покрытий с использованием летучих соединений объединены под общим названием процессы химического осаждения из газовой фазы (CDV, MOCVD, ALD, CVI, PECVD и др.). Основы MOCVD идентичны и практически не зависят от параметров экспериментального процесса. Общей идеологической платформой, объединяющей эти процессы, является транспорт паров исходного летучего соединения в зону осаждения из газовой фазы с использованием в качестве прекурсоров металлокомплексов с органическими лигандами (металлоорганическое химическое осаждение из паровой фазы). Основная причина разработки большого количества различных вариантов CVD-технологии заключается в том, что нет возможности напрямую контролировать процесс распада вещества прекурсора при обтекании поверхности.

При анализе реагирующего пограничного слоя можно использовать известные корреляции, характеризующие конвективный тепло- и массоперенос в не реагирующих системах. Для этого необходимо переключиться на такие переменные (обобщенные концентрации), чтобы уравнения и граничные условия такой задачи, записанные в безразмерной форме, оставались идентичными уравнениям и граничным условиям нереагирующей системы также представленных в безразмерной форме [5, 6]. Одним из удобных способов осуществить такой переход является переход от обычных массовых концентраций веществ к атомным долям $\widetilde{K}_j$, где j-индекс соответствующих атомов.

Интенсивность тепломасообмена определяется тремя группами условий. Во-первых, параметрами смеси газов на входе в реактор. В качестве реактора можно рассматривать плоскую твёрдую стенку или поверхность частицы псевдоожиженного слоя в вихревом реакторе. Что в свою очередь вносит свои особенности протекания тепломассообмена, которые могут быть формализованы в критериальном виде, например $St=St_0\Psi=f(Re, Pe,\ldots)$. Заметим, что во многих случаях, по нашим оценкам, величина Ψ имеет порядок единства. Для ламинарного пограничного слоя на пластине число теплопередачи Стентона $St_0=0.332Re^{1/2}$. *Re* - число Рейнольдса для пластины. И, в-третьих, это физико- химические условия, определяющие состав газов на «стенке». Для задач, связанных с испарением с поверхности это зависимость парциального давления насыщения от температуры. В задачах химического осаждения состав газовой фазы на стенке может быть связан с параметрами фронта реакции, которые в свою очередь могут быть оценены из стехиометрического соотношения глобальной реакции. Заметим, что при описании процессов переноса в псевдоожиженном слое как в гравитационном, так и во вращающемся центробежном может быть использован аналогичная подход, учитывающий локальную скорость обтекания частицы внутри слоя частиц в вихревой камере. Анализ аэродинамики закрученных духфазных потоков в некоторых случаях позволяет предложить соответствующие оценки [7].

Практическая значимость рассматриваемых подходов заключается в создании методик инженерного расчёта компактных тепломассообенных аппаратов, химических реакторов и других устройств, предназначенных как для организации эффективного испарения влаги из частиц слоя, сублимации частиц или химических процессов.

Список литературы:

1. Бояршинов Б.Ф., Волчков Э.П., Терехов В.И. Структура пограничного слоя со вдувом и горением этанола// Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28. № 3. С. 29.
2. Бояршинов Б.Ф., Терехов В.И. О соотношении тепловых потоков на поверхности при наличии фазового перехода // Известия Сибирского отделения Академии наук СССР. Серия технических наук. 1986. Т. 4. № 1. С. 25.
3. Terekhov V.I. Heat and mass transfer on permeable surface involving phase transaction and chemical reactions // Heat Transfer Research. 1992. Т. 24. № 2. С. 139.
4. Volchkov E.P., Terekhov V.V., Terekhov V.I. Boundary-layer heat and mass transfer for a forced flow of humid air with surface steam condensation //Thermophysics and Aeromechanics. 2000. Т. 7. № 2. С. 249.
5. Volchkov E.P., Terekhov V.V., Terekhov V.I. Influence of boundary conditions on the structure of laminar boundary layer with hydrogen combustion on a permeable surface // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2009. Т. 52. № 17-18. P. 4090-4094.
6. Лукашов В.В., Терехов В.В., Терехов В.И. Пристенные течения химически реагирующих веществ. Обзор современного состояния проблемы // Физика горения и взрыва. 2015. Т. 51. № 2. С. 23-36.
7. Кутателадзе С.С., Волчков Э.П., Терехов В.И. Аэродинамика и тепло-массообмен в ограниченных вихревых потоках. – Новосибирск: Изд. Ин-та теплофизики СО АН СССР, 1987. – 282 с.

Сопоставление и анализ теплофизичческих характеристик наножидкостей с углеродными нанотрубками

Рудяк В.Я.

УДК 532.517

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЕНТИЛЯЦИИ ТЕСТОВОГО ПОМЕЩЕНИЯ

Иванов Н.Г., Тельнов Д.С., Засимова М.А.

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

При вентиляции помещений могут проявляться интенсивные нестационарные явления с характерными размерами порядка масштаба течения и построенным по макро-масштабам задачи числом Струхаля порядка единицы. В докладе представляются результаты исследования крупномасштабной нестационарности воздушного потока, возникающих при вентиляции замкнутого тестового помещения – теплоизолированной климатической камеры с контролируемыми параметрами приточного воздуха. В камере размещена модель, позволяющая воспроизводить тепловые условия на поверхности тела человека (тепловой манекен), а также стол и стул. Цель исследования – получить оценки влияния автоколебаний на эффективность вентиляции, в частности, на характеристики теплового комфорта и на степень неоднородности распределения углекислого газа.

Геометрия климатической камеры и параметры теплового манекена соответствуют экспериментальному стенду, разработанному в Софийском техническом университете [1]. Камера, показанная на рис. 1, имеет высоту $H = 2.62$ м, и одинаковые поперечные размеры, L, и W, равные 1.9 м. На передней стенке в небольшом углублении находится дверь. Воздух поступает в камеру через два круглых приточных отверстия диаметром $d_{in} = 0.2$ м, размещенных в нижней части задней стенки под решетчатым настилом. Настил, установленный над полом камеры на высоте 0.39 м, использовался в экспериментах для выравнивания поля скорости в рабочем объеме камеры. В расчетах наряду с экспериментальными условиями рассматривались и постановки с частично снятыми элементами настила. Четыре вытяжных квадратных отверстия площадью 0.25×0.25 м^2 каждое расположены в верхней части камеры симметрично на двух боковых стенках. На потолке размещена лампа мощностью 100 Вт. Значения температуры приточного воздуха находились в диапазоне от 20 до 30°C. Температура поверхности манекена составляла $T_w = 32.4$°C. Полагалось, что манекен выделяет углекислый газ, значение источника составляло 1 кг/день.

Течение воздуха моделировалось на основе решения нестационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (URANS), замкнутых при помощи дифференциальной модели турбулентности (k-ω SST или одной из семейства k-ε моделей). Уровень турбулентности на входе определялся интенсивностью турбулентности $I = 6\%$ и отношением турбулентной вязкости к молекулярной, TVR = 10. Эффекты плавучести учитывались в приближении Буссинеска, физические свойства полагались постоянными. Расчеты проводились в гидродинамическом пакете ANSYS Fluent с использованием СКЦ «Политехнический» (scc.spbstu.ru). В расчетах использовались сетки размерностью от 1 до 5 млн ячеек

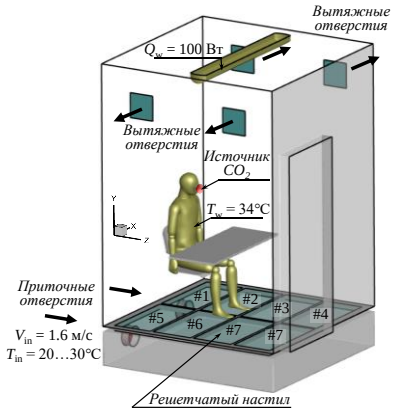


Рис. 1 Климатическая камера с тепловым манекеном

Выявлено, что при стационарной подаче приточного воздуха в помещении формируется нестационарная картина воздухораспределения. Интенсивные колебания, возникающие при взаимодействии двух приточных струй в пространстве между полом и решетчатым настилом, достаточно эффективно гасятся решетчатым настилом, однако даже в случае сплошного настила колебания проникают в помещение над ним. Второй источник нестационарности воздушного потока – тепловой факел над нагретым манекеном (рис. 2). Для различных значений температуры приточного воздуха и различных конфигураций настила проведен анализ интенсивности пульсаций, их пространственного распределения; выполнены оценки параметров теплового комфорта и эффективности удаления углекислого газа.

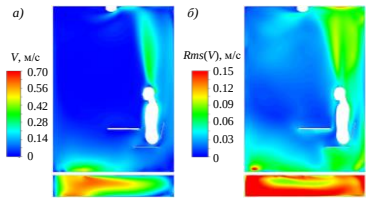


Рис. 2 Распределения а) осредненной во времени скорости и б) ее среднеквадратичного отклонения в среднем вертикальном сечении климатической камеры (T_{in} = 22°C, сняты элементы настила #2 и #5)

Список литературы:

1. Angelova R.A., Mijorski S., Markov D., Stankov P., Velichkova R., Simova I. Numerical modelling of the draught rate in a mechanically ventilated climate chamber // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. Vol. 1730. 7p.

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 24-19-00437

Тепломассоперенос в воздухо-воздушных регенеративных теплообменниках

Низовцев М.И.

Исследование фокусировки течения для задач локальной вентиляции

Чохар И.А., Спотарь С.Ю.

Тепломассообмен в энергоэффективных системах косвенно-испарительного охлаждения

Горбачев М.В.

УДК 621.9

СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕН В КАНАЛЕ С РЯДОМ ТРАНШЕЙНЫХ ЛУНОК

Ян Лун Н.[1,2], Терехов В.И.[1]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
[2] Новосибирский государственный технический университет,
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

В работе представлены результаты экспериментального исследования аэродинамики и теплообмена ряда траншейных лунок, расположенных на поверхности плоского канала. Проведено детальное исследование влияния лунок на профили продольной и поперечной компонент скорости и их пульсаций. Также проведены измерения гидравлического сопротивления канала с лунками. Измерения распределения скоростей проведено при угле наклона лунок φ = 45° к набегающему потоку и неизменном числе Рейнольдса $Re_{ch} = 3.9 \cdot 10^4$.

В различных отраслях современной техники есть острая необходимость в разработке новых систем интенсивного охлаждения, поэтому исследования в области интенсификации теплообмена активно проводятся во всем мире. К настоящему времени накоплен большой объем данных по влиянию различных вихрегенераторов на тепловые характеристики и гидравлические потери [1,2]. К таковым относятся лунки [3], табы, ребра, V–образные вихрегенераторы и т.д. В последние годы для целей интенсификации теплообмена активно пропагандируются удлиненные траншейные лунки, которые, по результатам численных исследований [4], обладают уникальными теплогидравлическими характеристиками. Аномальные свойства наклонных траншейных лунок согласно [4], объясняются наличием мощных вторичных течений вдоль размаха траншеи, которые приводят к интенсификации теплообмена. Однако экспериментального подтверждения эти выводы не получили [5].

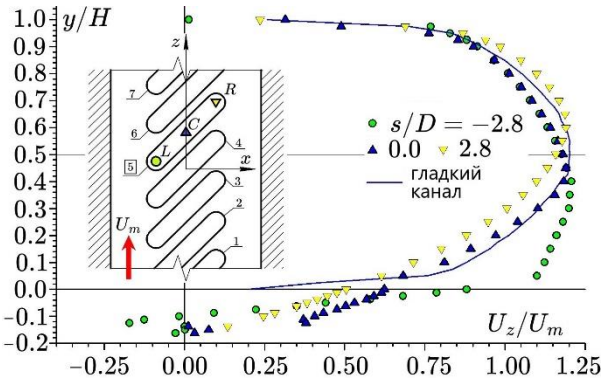


Рис. 1. Профили продольной скорости U_z для лунки №5, s/D = var

На рис. 1 показаны профили осевой скорости U_z в разных точках по размаху траншеи. Профиль L соответствует s/D = -2.8 (вход в лунку), профиль C - s/D = 0.0 (центр), а профиль R - s/D = +2.8 (выход их траншеи). Для сравнения здесь нанесен профиль продольной скорости U_z в гладком канале. Можно видеть, что профиль L представляет типичный распределение скорости при отрыве потока. Возвратное течение достигает 20% от среднерасходной скорости U_m. По мере удаления от начала лунки, возвратное течение исчезает, а сами профили становятся менее наполненными и скорость над лункой уменьшается. Такое поведение течения можно объяснить разрушением возвратного течения основным потоком.

На рис. 2 показаны распределение локального параметра интенсификации теплообмена Nu/Nu_0 в срединном сечении по длине канала, где величина Nu_0 есть число Нуссельта в гладком канале. Область наибольшего теплообмена расположена на задней кромке лунки, а наихудшего теплообмена – внутри лунки. Относительная теплоотдача растет по мере увеличения числа Рейнольдса, а стабилизация распределения теплоотдачи по длине канала достигается, начиная с 5 – ой траншеи.

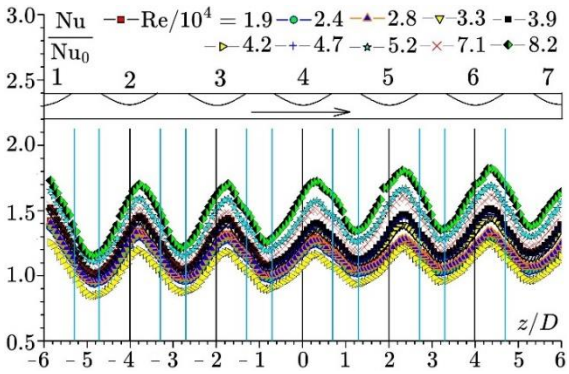


Рис. 2. Профили относительного числа Нуссельта Nu/Nu_0, s/D = 0.0, в разных лунках

Список литературы:

1. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. М.: Машиностроение, 1990. 200 с.
2. Ligrani P. Heat Transfer Augmentation Technologies for Internal Cooling of Turbine Components of Gas Turbine Engines // Int. J. of Rotating Machinery. 2013. Art. ID 275653, 32 p.
3. Terekhov V.I., Kalinina S.V., Mshvidobadze Yu.M. A review on heat transfer coefficient and aerodynamic resistance on a surface with a single dimple // J. Enhanced Heat Transfer, 2017, v. 24. is. 1-6, p. 411-426
4. Isaev S.A et al. NT Vortex enhancement of heat transfer and flow in the narrow channel with a dence packing of inclined one-row oval-trench dimples //Int. J. Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 145. 118737.
5. Терехов В.И., Терехов В.В., Чохар И.А., Ян Лун Н. Экспериментальное исследование структуры течения в одиночной траншейной лунке // Т и А, 2022, том 29, № 6. с. 935-947

УДК 532.542.1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ПОТОКА В ПРЯМОУГОЛЬНОМ КАНАЛЕ

Назаров Н.А.[1], Герасимов А.С.[1], Терехов В.В.[1], Терехов В.И.[1]

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

Исследования пульсирующих течений диктуются их активным применением в современной биомедицине [1], при изучении природных явлений [2], в машиностроении [3] и повышении эффективности охлаждения микроэлектроники [4]. При наличии пульсаций в потоке жидкости естественно ожидать изменения теплообмена с поверхностью, поскольку пульсации могут влиять на структуру пограничного слоя и приводить к изменению интенсивности теплообмена.

Опыты проводились в плоском прозрачном канале с поперечным сечением 20х 200 мм. Пульсации расхода создавались вращающейся заслонкой, по конструкции аналогичной используемой в работах [5-7]. Методом PIV были измерены поля скоростей и их флуктуаций потока и при частоте пульсаций 8 Гц. PIV система была синхронизована с углом поворота заслонки с шагом в 15° посредством оптического датчика, что позволило получить осредненные для конкретной фазы значения скорости потока. Число Рейнольдса, рассчитанное по осредненной по сечению и времени скорости и гидравлическому диаметру, было равным Re = 1.37*10^4.

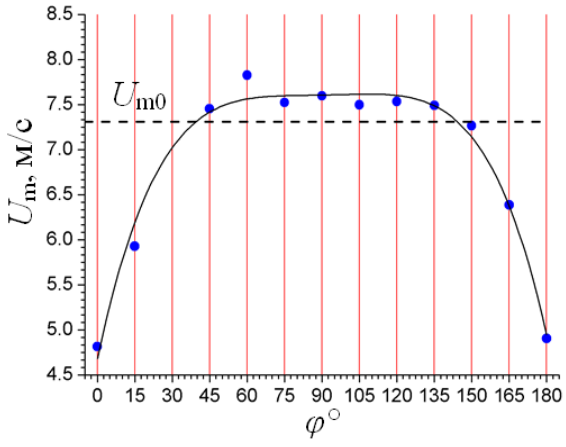


Рис. 1. Значения осевой скорости потока при различных фазах течения. Пунктирная линия - стационарный режим.

На рис. 1 показаны значения скорости U_m на оси канала на расстоянии 500 мм от входа в различные фазы. Амплитуда изменения скорости составляет 0.4. При этом наблюдалось небольшое отклонение периодического возмущения от гармонического закона.

В проделанных экспериментах также были получены значения пульсаций скорости, толщины вытеснения и потери импульса, коэффициенты сопротивления трения для различных значений фазы течения, определенных методом Клаузера. Было установлено, что в данных условиях изменение продольных пульсаций скорости достигает той же величины, что и изменение скорости, что указывает на возможное существенное влияние пульсаций расхода на перемешивание потока.

Однако, того же нельзя сказать о характеристиках пограничного слоя. В качестве примера, на рис. 2 показано изменение коэффициента сопротивления трения, пунктирной линией отмечена величина трения в стационарных условиях. Видно, что влияние пульсаций расхода оказалось в пределах 5 %, что говорит о возможности использования квазистационарного подхода при описании пульсирующего течения в рассматриваемых условиях.

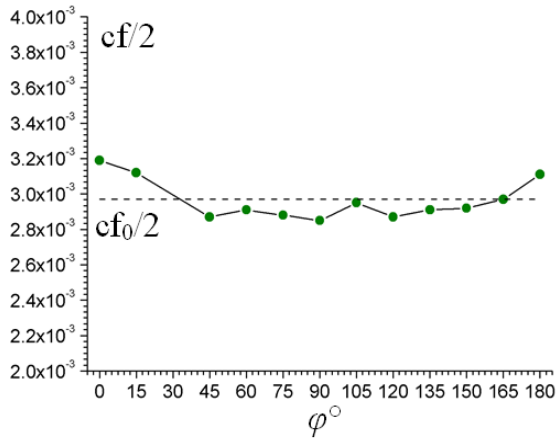


Рис. 2. Значение коэффициента сопротивления трения в зависимости от фазы течения

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 19-79-30075).

Список литературы:

1. Herrera-Valencia E.E. et al. On the pulsating flow behavior of a biological fluid: human blood // Rheol. Acta. 2017. Vol. 56, № 4. P. 387–407.
2. Li Y. et al. Surface topographic characteristics of suspended particulates in reclaimed wastewater and effects on clogging in labyrinth drip irrigation emitters // Irrigat. Sci. 2012. Vol. 30. P. 43–56.
3. Cumpsty N.A., Greitzer E.M. A simple model for compressor stall cell propagation // J. Eng. Power. 1982. Vol. 104, № 1. P. 170–176.
4. Sheriff H.S., Zumbrunnen D.A. Effect of flow pulsations on the cooling effectiveness of an impinging jet // J. Heat Transfer. 1994. Vol. 116, № 4. P. 886–895.
5. Zontul H., Şahin B. Experimental investigation of convective heat transfer performance and hydrodynamics of pulsating flow through the rectangular grooved channel // Exp. Therm. Fluid Sci. 2023. Vol. 141, 110796.
6. Давлетшин И.А., Михеев Н.И. Структура течения и теплообмен при отрыве пульсирующего потока // ТВТ, 2012, том 50, № 3, с. 442–449.
7. Kurtulmuş N., Sahin B. Experimental investigation of pulsating flow structures and heat transfer characteristics in sinusoidal channels // Int. J. Mech. Sci., 2020. Vol. 167, 268.

Содержание

Секция 1 Гидродинамика, тепломассообмен и волновые процессы в многофазных средах **.... 4**

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПРОЦЕССА ИСТЕЧЕНИЯ ГАЗА В ЗАПОЛНЕННУЮ ЖИДКОСТЬЮ ОТКРЫТУЮ ОБЛАСТЬ С ТРУБЧАТОЙ РЕШЕТКОЙ 5
Алексеев М.В., Лежнин С.И.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕПОДВИЖНОГО ГАЗОВОГО СНАРЯДА ТЕЙЛОРА В ДВУХМЕРНОМ, ОСЕСИММЕТРИЧНОМ ПРИБЛИЖЕНИИ 6
Алексеев М.В., Лукьянов Ан.А.

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПАРООБРАЗОВАНИЯ И ВТОРИЧНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ КАПЕЛЬ С ЦЕЛЬЮ ПОДАВЛЕНИЯ ГОРЕНИЯ 7
Антонов Д.В., Стрижак П.А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ДВУХ НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ ВНУТРИ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ФОРСУНКИ 8
Апостол Ю.С., Вожаков И.С., Хребтов М.Ю., Мулляджанов Р.И.

МЕТОДЫ ПАССИВНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ПОТОКОВ 9
Байметова Е.С., Волков В.С.

ИЗУЧЕНИЕ ВОЛНОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОЛЬЦЕВОГО ГАЗОЖИДКОСТНОГО ТЕЧЕНИЯ ВДОЛЬ ШИРОКОЙ СТОРОНЫ ПРЯМОУГОЛЬНОГО МИКРОКАНАЛА 10
Барткус Г.В., Кузнецов В.В.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ ВЯЗКИХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ЖИДКОСТЕЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ 11
Валиуллина В.И., Галеев Р.Р., Мусин А.А., Зиннатуллин Р.Р.

ВЛИЯНИЕ БЕЗРАЗМЕРНОЙ ЧАСТОТЫ ВИБРАЦИЙ НА ПАРАМЕТРИЧЕСКУЮ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ЖИДКОСТЕЙ В ЩЕЛЕВОМ ЗАЗОРЕ 12
Власова О.А., Козлов В.Г.

ДИНАМИКА И РЕЖИМЫ КИПЕНИЯ КАПЛИ HFE-7100 И ВОДЫ ПРИ СОУДАРЕНИИ С ПЕРЕГРЕТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ 13
Гатапова Е.Я., Ситников В.О.

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНО АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ НА РАЗМЕР И ХАРАКТЕР ДВИЖЕНИЯ ПУЗЫРЕЙ ОТ ОДИНОЧНОГО КАПИЛЛЯРА В НАКЛОННОЙ ТРУБЕИЗЛУЧЕНИЯ 14
Гореликова А.Е., Волков С.М., Воробьев М.А.

МЕТОДИКА УПРОЩЕННОГО CFD РАСЧЕТА РАСПЫЛА ЦЕНТРОБЕЖНЫМИ ФОРСУНКАМИ 15
Дектерев Ар.А., Дектерев А.А.

ИНЕРЦИОННЫЕ ВОЛНЫ БОЛЬШОЙ АМПЛИТУДЫ 16
Держо О.Г.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ТОНКОЙ ЖИДКОЙ ПЛЁНКИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ГАЗОВЫМ ВИХРЕМ 17
Дрожжин А.П.

ОСЦИЛЛЯЦИОННОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ 18
Дьякова В.В., Власова О.А., Козлов В.Г.

КОРРЕКЦИЯ ОШИБОК В КОРРЕЛЯЦИОННОМ АНАЛИЗЕ ПРИ ОБРАБОТКЕ ТЕНЕВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЕЙ 19
Евдокименко И.А., Лобанов П.Д., Чинак А.В., Филиппский К.А.

ДВИЖЕНИЕ ДВУХФАЗНОЙ СРЕДЫ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ПУЧКЕ ТРУБ ПРИ РАЗНЫХ РЕЖИМАХ ТЕЧЕНИЯ 20
Прибатурин Н.А., Лобанов П.Д., Евдокименко И.А., Филиппский К.А.

ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН ДВУХФАЗНОГО ПУЗЫРЬКОВОГО ТЕЧЕНИЯ В КАНАЛЕ С ОДИНОЧНОЙ ПРЕГРАДОЙ 21
И.А. Евдокименко, К.А. Филиппский, П.Д. Лобанов, А. В. Чинак, Си-Ахмед Э-К., Джентрик К., Блель В., Легран Д.

КАПИЛЛЯРНОЕ ВЫТЕСНЕНИЕ НЕФТИ ИЗ ГОРНОЙ ПОРОДЫ 22
Жигарев В. А., Минаков А. В., Пряжников М. И., Пряжников А. И.

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ЖИДКОСТИ НА РАЗВИТИЕ КОЛЬЦЕВОГО ГАЗОЖИДКОСТНОГО ТЕЧЕНИЯ В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРУБЕ 23
Здорников С.А., Исаенков С.В., Черданцев А.В.

ДИНАМИКА СФЕРИЧЕСКОГО ТЕЛА ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПРОКАЧКЕ ЖИДКОСТИ В КАНАЛЕ С НЕОДНОРОДНЫМ ВДОЛЬ ОСИ СЕЧЕНИЕМ 24
Карпунин И.Э.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МИГРАЦИИ УГЛЕВОДОРОДОВ С УЧЁТОМ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ СЛУЧАЕВ ГЛУБОКОВОДНЫХ РАЗЛИВОВ 25
Кильдибаева С.Р., Харисов Э.И., Рафиков Н.Р.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ МИКРО- И МАКРОМАСШТАБНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ВЫТЕСНЕНИЕ ВЯЗКОЙ НЕФТИ ВОДОЙ В ДВУХСЛОЙНОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ 26
Кузнецов В.В.

ВЛИЯНИЕ УГЛА НАКЛОНА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНОГО ГАЗОСОДЕРЖАНИЯ В ВОСХОДЯЩЕМ ГАЗОЖИДКОСТНОМ ТЕЧЕНИИ В КРУГЛОЙ ТРУБЕ 27
Гореликова А.Е., Кашинский О.Н., Курдюмов А.С.

РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ И СМЕШЕНИЯ НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДОСТИ В U-ОБРАЗНОМ МИКРОКАНАЛЕ 28
Лобасов А.С., Якимов А.С., Минаков А.В., Филимонов С.А.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ РЕЖИМОВ ТЕЧЕНИЯ В КОЛЬЦЕВОМ ПОТОКЕ КУЭТТА-ТЕЙЛОРА 29
Миськив Н.Б., Мамонов В.Н., Назаров А.Д., Серов А.Ф., Терехов В.И.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА ЧЕРЕЗ ЯЧЕЙКУ ПОГРУЖЕННОГО ДЫРЧАТОГО ЛИСТА С ПОМОЩЬЮ КОДА OPENFOAM 30
Мелихов В.И., Никулин А.С.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУР СИДЯЧЕЙ КАПЛИ ЖИДКОСТИ НА СТРУКТУРИРОВАННОЙ И ПОРИСТОЙ ПОВЕРХНОСТИ 31
Пещенюк Ю.А., Гатапова Е.Я.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЧАСТИЦ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ЗА УДАРНОЙ ВОЛНОЙ 32
Полянский Т.А., Зайцев А.В.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОЛН НА ГРЕБНЕ СТРУИ НА ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВАЕМОЙ ПЛЁНКИ ЖИДКОСТИ 33
Семионов В.В., Чиннов Е.А.

ДРОБЛЕНИЕ КАПЕЛЬ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ПОТОКЕ ВОЗДУХА 34
Сыродой С.В., Замалтдинов Р.Р.

ОБ АДДИТИВНОСТИ СОБСТВЕННОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ЖИДКОСТИ И ПУЗЫРЬКОВОЙ ПСЕВДОТУРБУЛЕНТНОСТИ В ВОСХОДЯЩЕМ ТЕЧЕНИИ В ТРУБЕ 35
Тимкин Л.С., Горелик Р.С.

ДВИЖЕНИЕ КЛАСТЕРА МОНОДИСПЕРСНЫХ КАПЕЛЬ МАСЛА В ДИСТИЛЛИРОВАННОЙ ВОДЕ 36
Архипов В.А., Усанина А.С., Чуркин Р.А.

ИЗМЕНЕНИЕ ГЕМОДИНАМИКИ АНЕВРИЗМЫ БРЮШНОЙ АОРТЫ В ПРОЦЕССЕ ЕЕ РАСШИРЕНИЯ 37
Федотова Я. В., Калачев И. В., Тотмина Е. В., Карпенко А. А., Мулляджанов Р. И.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА С ВОДЯНЫМ ПАРОМ ВНУТРИ ФОРСУНКИ С ПРОТИВОВРАЩЕНИЕМ 38
Жерибор М.О., Хребтов М.Ю.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ В ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ФОРСУНКЕ 39
Хребтов М.Ю., Вожаков И.С., Мулляджанов Р.И.

О НЕКОТОРЫХ РЕШЕНИЯХ УРАВНЕНИЯ ГИНЗБУРГА-ЛАНДАУ В ФАЗОВОМ ПРИБЛИЖЕНИИ 40
Цвелодуб О.Ю.

ПРЯМАЯ И ОБРАТНАЯ ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЕЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА 41
Черный С.Г., Зезюлин И.В., Тарраф Д., Почуев А.П., Бороненко И.С.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОПРЯЖЕННОГО ТЕПЛООБМЕНА ПАДАЮЩЕЙ КАПЛИ С ТВЕРДОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ 42
Шаин А.М., Вожаков И.С.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ГАЗО-ЖИДКОСТНЫХ ТЕЧЕНИЙ В МИНИКАНАЛЬНЫХ СМЕСИТЕЛЯХ 43
Швенг Н.А., Роньшин Ф.В.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ С КРУПНЫМИ ЧАСТИЦАМИ 44
А.В. Шебелев , А.А. Гаврилов , А.В. Минаков

ТРИГГЕР ПАРОВОГО ВЗРЫВА КАПЛИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО РАСПЛАВА В ВОДЕ. ОБСУЖДЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ 45
Ивочкин Ю.П., Синкевич О.А., Щигель С.С, Юдин С.М.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФРАГМЕНТАЦИИ РАСПЛАВОВ МЕТАЛЛОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ВОДОЙ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ 46
Бородина Т.И., Ивочкин Ю.П., Кубриков К.Г. , Синкевич О.А., Тепляков И.О., Юдин С.М.

Секция 2 Тепломассообмен при фазовых превращениях **47**

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТНОЙ ПЛОТНОСТИ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА ПРИ КИПЕНИИ ПО ПОВЕРХНОСТИ ТРУБЧАТОГО НАГРЕВАТЕЛЯ 48
Сапожников С. З., Митяков В. Ю., Бобылев П. Г., Павлов А.В.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРЯМОГО СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПРОЦЕССЫ ПЛАВЛЕНИЯ ПАРАФИНА В ЗАМКНУТОЙ ДВУМЕРНОЙ ОБЛАСТИ 49
Бондарева Н.С., Шеремет М.А.

ВЛИЯНИЕ ВЫСОТЫ СЛОЯ ЖИДКОСТИ НА ПУЛЬСАЦИИ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ИСПАРЕНИИ/КИПЕНИИ В УСЛОВИЯХ ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ 50
Брестер А.Е., Жуков В.И., Павленко А.Н.

ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ НА БИФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ С МАССИВАМИ КАНАВОК 51
Владимиров В.Ю., Хмель С.Я., Чиннов Е.А.

ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ ВОДЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ЧЕРНОГО КРЕМНИЯ 52
Володин О.А., Сердюков В.С., Вячеславова Е.А.

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ОБРАТНОГО ГРАДИЕНТА ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ФАЗОВОМ ПЕРЕХОДЕ 53
Гатапова Е.Я.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛЕНОЧНОГО КИПЕНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СТРУИ НЕДОГРЕТОЙ ЖИДКОСТИ 54
Губанова Т.А., Ягов В.В.

ОСОБЕННОСИ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ТЕЧЕНИЙ В АДИАБАТНЫХ УСЛОВИЯХ И ТЕПЛОМАССОБМЕНА В УСЛОВИЯХ ЛОКАЛЬНОГО НАГРЕВА В ПЛОСКИХ МИКРОКАНАЛАХ 55
Дементьев Ю.А., Дегтярев С.А., Чащина М.С., Роньшин Ф.В., Чиннов Е.А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССООБМЕНА В ПОДОГРЕВАТЕЛЯХ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ АЭС И ТЭС 56
Есин С.Б., Миронова М.В., Сухоруков Ю.Г., Минаков А.В., Платонов Д.В.

ТЕПЛООТДАЧА В КАНАЛЕ С ВНУТРЕННИМИ ИНТЕНСИФИКАТОРАМИ ПРИ ЦИРКУЛЯЦИИ АЗЕОТРОПНОЙ СМЕСИ..... 57
Жуков В.Е., Мезенцева Н.Н.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ПРИ РОСТЕ ОДИНОЧНОГО ПАРОВОГО ПУЗЫРЯ В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ..... 58
Зорькина А.И., Роньшин Ф.В., Кабов О.А.

РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ БОРЬБЫ С ОБЛЕДЕНЕНИЕМ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ В АРКТИКЕ 59
Кабардин И.К., Меледин В.Г., Двойнишников С.В., Янчат Т.Н., Мухин Д.Г., Гордиенко М.Р., Какаулин С.В., Ледовский В.Е., Зубанов К.С., Зуев В.О.

КИНЕТИКА СПОНТАННОГО ВСКИПАНИЯ И ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ РАСТВОРА ПРОПАН–МЕТАН..... 60
Каверин А.М., Андбаева В.Н., Билюкова М.Р., Панков А.С., Хотиенкова М.Н.

КИПЕНИЕ ЖИДКОСТИ В КАНАЛЕ С ГРАФЕНОВЫМ ПОКРЫТИЕМ 61
Кочкин Д.Ю., Зайцев Д.В., Белослудцев В.В., Архипов В.Е., Кабов О.А.

ВЛИЯНИЕ ПОРИСТЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ, НА ТЕПЛООБМЕН И КРИЗИСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ КИПЕНИИ АЗОТА, ВКЛЮЧАЯ РЕЖИМЫ НЕСТАЦИОНАРНОГО НАГРЕВА И ОХЛАЖДЕНИЯ 62
Кузнецов Д.В., Павленко А.Н.

ИЗМЕРЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ЦЕНТРОВ ПАРООБРАЗОВАНИЯ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ВСКИПАНИИ ВОДЫ..... 63
Левин А.А., Хан П.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООТДАЧИ В ТЕРМОСИФОНЕ ПРИ ВАКУУММЕТРИЧЕСКОМ ДАВЛЕНИИ .. 64
Лычаков В.Д., Матяш А.С., Борисов А.О., Балунов Б.Ф.

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ СПИНОДАЛЬНОМ РАСПАДЕ ЖИДКОГО РАСТВОРА С УЧЕТОМ ВЯЗКОУПРУГИХ ЭФФЕКТОВ..... 65
Мелких А.В., Скрипов П.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА И ГИДРОДИНАМИКИ ТЕЧЕНИЯ ОРОШАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ НА ОДНОРЯДНОМ ВЕРТИКАЛЬНОМ ПАКЕТЕ НАКЛОННЫХ ТРУБ ПЛЕНОЧНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА 66
Павленко А.Н., Катаев А.И., Миронова И.Б.

ИССЛЕДОВАНИЕ КИПЕНИЯ В ЩЕЛЕВОМ МИКРОКАНАЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СКОРОСТНОЙ ШЛИРЕН-ВИЗУЛИЗАЦИИ И ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ 67
Павлов И.А., Зорькина А.И., Роньшин Ф.В.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ГРАВИТАЦИОННОГО ОСАЖДЕНИЯ И ИСПАРЕНИЯ ОДИНОЧНОЙ КАПЛИ 68
Архипов В.А., Басалаев С.А., Золоторёв Н.Н., Перфильева К.Г., Романдин В.И.

РЕЖИМЫ ВСКИПАНИЯ ЭМУЛЬСИИ ВОДА / РАПСОВОЕ МАСЛО ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМАХ НАГРЕВА..... 69
Поволоцкий И.И., Волосников Д.В., Губин А.А., Старостин А.А., Шангин В.В., Антонов Д.В.

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ СЛОЯ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ НА МЕХАНИЗМ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО – И МАССОПЕРЕНОСА, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ ЕГО СУШКИ 70
Сыродой С.В., Нигай Н.А., Познахарев А.С.

ВЛИЯНИЕ НАЛИЧИЯ ТОНКОГО ПОРИСТОГО ПОКРЫТИЯ НА НАГРЕВАТЕЛЕ НА КРИТИЧЕСКИЙ ТЕПЛОВОЙ ПОТОК В ПЛОСКИХ МИКРОКАНАЛАХ С ИНТЕНСИВНЫМ ЛОКАЛИЗОВАННЫМ НАГРЕВОМ..... 71
Пуховой М.В., Зайцев Д.В.

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ОТСЕКА НАГРЕВА СМЕШИВАЮЩЕГО ПОДОГРЕВАТЕЛЯ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ 72

Святкин Ф.А., Лычаков В.Д., Усов Ю.В., Матяш А.С., Балунов Б.Ф.

КИПЕНИЕ ЖИДКОСТИ В МИНИ КАНАЛЕ НА ГЛАДКОЙ, ШЕРОХОВАТОЙ И ПОРИСТОЙ ПОВЕРХНОСТИ 73
Семенов А.А., Зайцев Д.В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ СУХИХ ПЯТЕН ПРИ КИПЕНИИ ВОДЫ НА КРЕМНИЕВОЙ ПОВЕРХНОСТИ 74
Стародубцева И.П.

ТЕПЛООБМЕН И РАЗВИТИЕ КРИЗИСНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ СПРЕЙНОМ ОХЛАЖДЕНИИ: ИССЛЕДОВАНИЕ, ОПТИМИЗАЦИЯ И МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ 75
Суртаев А.С., Половников М.А., Миськив Н.Б., Павленко К.А., Владыко И.В.

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ УДАРА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ И УСЛОВИЯ ИСПАРЕНИЯ КАПЛИ ВОДЫ С ТЕКСТУРИРОВАННОЙ ПОДЛОЖКИ 76
Сыродой С.В., Тамашевич М.С.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРЕВА И ИСПАРЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТЕЛА В ИНДУКТОРЕ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РАЗРАБОТКЕ КОСМИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ ИСПАРИТЕЛЬНОГО ТИПА 77
Виноградов Д.А., Глазков В.В., Ковешников К.С, Тепляков И.О.

МОДЕЛИ МИКРО-ВЗРЫВНОГО РАСПАДА ДВУХЖИДКОСТНЫХ КАПЕЛЬ И ИХ ВНЕДРЕНИЕ В ANSYS FLUENT 78
Федоренко Р.М., Антонов Д.В., Стрижак П.А., Сажин С.С.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КИПЕНИЯ НА ПОРИСТОЙ ПОВЕРХНОСТИ 79
Федосеев А.В., Сальников М.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ В БОЛЬШОМ ОБЪЕМЕ НА МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ 80
Филиппов М.Д., Дедов А.В.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИСПАРЕНИЯ КАРБИДА ТАНТАЛА-ЦИРКОНИЯ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ СВЫШЕ 4000 К 81
Фролов А.М., Петухов С.В., Булава А.С.

ОСОБЕННОСТИ НЕСТАЦИОНАРНОГО КИПЕНИЯ НЕДОГРЕТОЙ ВОДЫ НА МОДИФИЦИРОВАННОЙ ЛАЗЕРОМ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ 82
Хан П.В., Левин А.А., Москвин М. К., Сафаров А.С., Филатов И.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ТЕПЛОВОЙ ТРУБЕ С РАЗНЫМ РАЗМЕРОМ ПОР 83
Чевера В.В., Вожаков И.С., Лукьянов А.А.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КИПЕНИЯ В ТРЕХМЕРНЫХ МИКРОПОРАХ 84
Шебелев А.В., Зайцев Д.В. Кабов О.А.

ОХЛАЖДЕНИЕ СТРУКТУРИРОВАННОЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДИСПЕРГИРОВАННЫМ ПОТОКОМ 85
В.С. Штелинг, А.Т. Комов, П.П. Щербаков, А.В. Захаренков, А.П. Слива

ВСКИПАНИЕ ПЕРЕГРЕТОЙ ВОДЫ, ИСТЕКАЮЩЕЙ ИЗ ДВУХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КАНАЛОВ 86
Шурупов В.А., Бусов К.А.

Секция 3 Конвективные течения в однофазных средах **87**

РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ ПОГРУЖЕННОГО ТЕЛА В КОНВЕКТИВНОМ СЛОЕ 88
А. Ю. Васильев, П. Г. Фрик, Е. Н. Попова, А. Н. Сухановский, С. А. Филимонов, А. А. Гаврилов.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКЦИИ РЕЛЕЯ-БЕНАРА В ТОНКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СЛОЯХ ЖИДКОСТИ 89
Винокуров В.А, Винокуров В.В, Кабов О.А, Марчук И.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТЕЧЕНИИ СМЕСИ ГАЗОВ С МАЛЫМ ЧИСЛОМ ПРАНДТЛЯ В СТЕРЖНЕВОЙ СБОРКЕ С РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫМИ РЕШЕТКАМИ 90

Витовский О.В., Макаров М.С., Лебеда Л.С., Наумкин В.С.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТЕЧЕНИИ ВОЗДУХА И ГЕЛИЙ-КСЕНОНОВОЙ СМЕСИ В СЕМИСТЕРЖНЕВОЙ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКЕ 91
Лебеда К.С., Макаров М.С., Наумкин В.С., Витовский О.В.

БЕСКОНТАКТНОЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЕ ЖИДКОСТЕЙ ЗА СЧЕТ КОНВЕКЦИИ..... 92
Зайцев А.С., Белоногов М.В., Кизириди В.Г.

СВОБОДНАЯ КОНВЕКЦИЯ ВОЗДУХА ОКОЛО ГОРИЗОНТАЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННЫХ ОДИНОЧНОЙ ОРЕБРЕННОЙ ТРУБЫ И ОДНОРЯДНОГО ПУЧКА ТРУБ 93
Засимова М.А., Филатова А.В., Абрамов А.Г.

ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО СОПРЯЖЕННОГО КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ПОЛОСТЯХ И В ПЛОСКИХ СЛОЯХ ЖИДКОСТИ..... 94
Кислицын С.А., Митин К.А., Бердников В.С., Гришков В.А., Михайлов А.В., Юровских Е.А.

ВЛИЯНИЕ ПОРИСТЫХ РЕБЕР НА ЕСТЕСТВЕННУЮ КОНВЕКЦИЮ НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ В ПОЛОСТИ С ИСТОЧНИКОМ ЭНЕРГИИ 95
Лоенко Д.С., Шеремет М.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ И КОНВЕКТИВНОЙ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ NOVEC 7100 В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ С ВНУТРЕННИМ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЕМ 96
Мишин Г.А., Попандопуло Х.Ю., Вершинина Ю.В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ВНУТРЕННЕМ ТЕЧЕНИИ ГАЗОВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В СЕМИСТЕРЖНЕВОЙ СБОРКЕ ТВЕЛОВ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ 97
Наумкин В.С. Макаров М.С., Лебеда К.С., Витовский О.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ В ФОТОБИОРЕКТОРАХ 98
Наумов И.В., Шарифуллин Б.Р., Тинтулова М.В., Геворгиз Р.Г.

АВТОКОЛЕБАНИЯ В РЕЗОНАТОРЕ ГЕЛЬМГОЛЬЦА С НЕРАВНОМЕРНО НАГРЕТЫМИ СТЕНКАМИ: ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ 99
Пашин А.В.

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ГАЗОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН ПОТОКОВ ГАЗА ПРИ ЗАПОЛНЕНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОЛОСТИ ЧЕРЕЗ КАНАЛЫ РАЗНОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ 100
Плотников Л.В., Давыдов Д.А., Красильников Д.Н., Шурупов В.А.

ГИДРОДИНАМИКА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ РЕШЕТЧАТЫХ КОНСТРУКЦИЙ В СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ В СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ..... 101
Саетгараев А.А., Лопатин А.А., Габдуллина Р.А.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В ЭЖЕКТОРЕ С ЭФФЕКТОМ КОАНДА 102
Карпов П.Н., Кульпанович Г.Т., Отмахов О.Ю., Скибина Н.П., Чохар И.А., Пахомов М.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА ТРЕХ НЕСМЕШИВАЕМЫХ ЖИДКОСТЕЙ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КОНТЕЙНЕРЕ 103
Тинтулова М.В., Наумов И.В., Шарифуллин Б.Р., Штерн В.Н.

УСТОЙЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В КАНАЛЕ С ВОЛНИСТЫМИ СТЕНКАМИ 104
Трифонов Ю.Я.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПОГРУЖЕННОЙ ПЛАСТИНЫ В РАЗВИТОМ СВОБОДНО КОНВЕКТИВНОМ СЛОЕ ПРИ РАДИАЦИОННОМ НАГРЕВЕ ДНА..... 105
Филимонов С.А., Гаврилов А.А., Литвинцев К.Ю.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ В ЖИДКОСТИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ 106
Шарифуллин Б.Р., Наумов И.В.

О РОЛИ СКРЫТОГО ИНТЕГРАЛА ДВИЖЕНИЯ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ВОЗВРАТНОГО ТЕЧЕНИЯ В НЕАВТОМОДЕЛЬНОЙ ЗАКРУЧЕННОЙ СТРУЕ 107
Яворский Н.И.

Секция 4 Методы управления турбулентностью и интенсификация тепломассопереноса .. **108**

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА В ОРЕБРЕННОМ КАНАЛЕ ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ ПОЛОЖЕНИЯ И РАЗМЕРА РЕБРА 109
Барсуков А.В., Терехов В.В., Терехов В.И.

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА ЗА ОДИНОЧНЫМ РЕБРОМ В КОЛЬЦЕВОМ ЗАЗОРЕ С ВНУТРЕННИМ ВРАЩАЮЩИМСЯ ЦИЛИНДРОМ 110
Богатко Т.В., Терехов В.В., Терехов В.И.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ СТРУЙНЫМ ТЕЧЕНИЕМ С ПОМОЩЬЮ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ..... 111
Ванькова О.С., Яковенко С.Н.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО СПИРАЛЬНОГО ТЕЧЕНИЯ НЕНЬЮТОНОВСКОЙ СТЕПЕННОЙ ЖИДКОСТИ В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ ПРИ УМЕРЕННОМ ЧИСЛЕ РЕЙНОЛЬДСА 112
Гаврилов А.А., Игнатенко Я.С.

ФЛУКТУАЦИИ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА В ИМПАКТНЫХ СТРУЯХ..... 113
Герасимов А.С., Леманов В.В.

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛООТДАЧИ ДЛЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЛЕНОЧНОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ПО ПОВЕРХНОСТИ ТРУБОК КОЛОННЫ СПГ..... 114
Гешев П.И.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПАРЫ ЦИЛИНДРОВ В ПОПЕРЕЧНОМ СЖИМАЕМОМ ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ..... 115
Здитовец А.Г., Киселев Н.А., Виноградов Ю.А.

ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЕ ПРОДОЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ СТРЕЛОВИДНОГО КРЫЛА..... 116
Бойко А.В., Бородулин В.И., Иванов А.В., Мищенко Д.А., Черепанов А.Д.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДИНОЧНОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ПАФФА В ОТКРЫТОЙ СТРУЕ..... 117
Иващенко В.А., Шаров К.А., Леманов В.В., Никитин Н.В., Мулляджанов Р.И.

УСИЛЕНИЕ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ОТРЫВНОГО ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА В ПРОФИЛИРОВАННОЙ КАНАВКЕ ТИПА БУМЕРАНГ НА ПЛАСТИНЕ ПРИ ОПТИМАЛЬНОЙ ДЛИНЕ ОРИЕНТИРОВАННОЙ ПО ПОТОКУ КОНЦЕВОЙ ЧАСТИ..... 118
Исаев С.А., Никущенко Д.В., Попов И.А., Сероштанов В.В., Миронов А.А., Клюс А.А.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОДЕЛИРУЕМЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НАБЕГАЮЩЕГО ПОТОКА С ЗАТУПЛЕННОЙ ПЕРЕДНЕЙ КРОМКОЙ СТРЕЛОВИДНОГО КРЫЛА 119
Катасонов М.М., Козлов В.В.

СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ 3D-PTV И TOMO-PIV НА ПРИМЕРЕ ЗАТОПЛЕННОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУИ С ЗАКРУТКОЙ ПОТОКА 120
Кирчанова Е.Е., Сорокин М.И., Хребтов М.Ю., Токарев М.П., Дулин В.М.

НАРУШЕНИЕ АНАЛОГИИ РЕЙНОЛЬДСА В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ С ГРАДИЕНТОМ ДАВЛЕНИЯ В МАЛОРАЗМЕРНОМ СВЕРХЗВУКОВОМ ЩЕЛЕВОМ КАНАЛЕ..... 121
Киселёв Н.А., Маластовский Н.С., Здитовец А.Г., Виноградов Ю.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ ГАЗОВОЙ ЗАВЕСЫ ЗА ОТВЕРСТИЯМИ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ 122
Колесова А.А., Веретенников С.В., Колесова Е.Г., Евдокимов О.А.

ИЗМЕНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ПРИ РАСПАДЕ КВАНТОВОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ 123
Кондаурова Л.П.

ВЛИЯНИЕ ЩЕЛЕВОГО ЗАЗОРА НА ДИНАМИКУ РАЗВИТИЯ КАВИТАЦИОННЫХ ПОЛОСТЕЙ ВБЛИЗИ ДВУМЕРНЫХ ТЕЛ ОБТЕКАНИЯ..... 124
Кравцова А.Ю., Цой М.А., Скрипкин С.Г., Литвинова Д.В., Сиковский Д.Ф., Маркович Д.М.

ТЕЧЕНИЕ В КАНАЛЕ С РАЗНОМАСШТАБНЫМИ ПРЕПЯТСТВИЯМИ: ОТСОЕДИНЕННЫМ

РЕБРОМ И ОБРАЩЕННЫМ ПРОТИВ ПОТОКА УСТУПОМ 125
Дьяченко А.Ю., Кульпанович Г.Т., Смульский Я.И.

ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В МОДЕЛИ ТВС С 19 ИМИТАТОРАМИ ТВЭЛОВ 126
Лукьянов Ан.А., Шестаков М.В., Токарев М.П.

LES ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАДИАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ НА ДИНАМИКУ ПРЕЦЕССИРУЮЩЕГО ВИХРЕВОГО ЯДРА В ВОЗДУШНОЙ ТУРБИНЕ ФРЕНСИСА 127
Лутченко И.И., Палкин Е.В., Мулляджанов Р.И.

ЛОКАЛЬНАЯ ЛАМИНАРИЗАЦИЯ УСКОРЕННОГО ПОТОКА КСЕНОНА ПРИ ВДУВЕ ГОРЯЧЕГО ГЕЛИЯ ЧЕРЕЗ ПРОНИЦАЕМУЮ СТЕНКУ 128
Наумкин В.С., Сахнов А.Ю., Брызгалов К.В.

УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОДИНАМИКОЙ ПОТОКА В МОДЕЛЬНОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЛИНЕАРИЗОВАННЫХ УРАВНЕНИЙ 129
Палкин Е.В., Проскурин А.В., Мулляджанов Р.И.

УПРАВЛЕНИЕ ПРОФИЛЕМ СРЕДНЕЙ СКОРОСТИ И ТУРБУЛЕНТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ПРИ ТЕЧЕНИИ ЖИДКОСТИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ С ЛАМИНАРИЗИРУЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ 130
Пантелеев С.А., Лукьянов А.А., Зарипов Д.И.

ВЛИЯНИЕ ЗАКРУТКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ ОБЛАСТЕЙ ОТРЫВА ПОТОКА В РАЗВЕТВЛЕННЫХ КАНАЛАХ 131
Молочников В.М., Пашкова Н.Д., Паерелий А.А., Никифоров И.В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ ПРИ ПОМОЩИ ОТКРЫТОГО КОДА FLUIDX3D 132
Плеханов М.С., Сальников М.В., Мулляджанов Р.И.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ПЕРЕМЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ТРАНЗИТНОЕ ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ 133
Полуянов А.О., Колесниченко И.В.

ТЕЧЕНИЕ В СУЖАЮЩЕМСЯ КАНАЛЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕПЛОВЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ .. 134
Сахнов А.Ю., Брызгалов К.В., Наумкин В.С.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ОБТЕКАНИЯ СИММЕТРИЧНОГО КРЫЛОВОГО ПРОФИЛЯ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ВЕТРЯНЫХ ТУРБИН 135
Сентябов А.В.

ПОСТРОЕНИЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ АЭРОДИНАМИКИ ЦИКЛИЧЕСКОГО ДВИЖИТЕЛЯ 136
Дектерев Ар. А., Дектерев А.А., Сентябов А.В., Филимонов С.А.

ТЕЧЕНИЕ И ТЕПЛООБМЕН ПРИ ОБТЕКАНИИ КРУГЛОГО ЦИЛИНДРА СО СТЕРЖНЯМИ-ТУРБУЛИЗАТОРАМИ 137
Сероштанов В.В., Князев С.А., Гусаков А.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ КРУПНЫХ ВИХРЕЙ В БЛИЖНЕЙ ОБЛАСТИ СВОБОДНОЙ СТРУИ ПРИ КОЛЬЦЕВОМ И РАДИАЛЬНОМ ПЕРИДИЧЕСКОМ ВДУВЕ НА КРОМКЕ СОПЛА 138
Сорокин М.И., Кушнарев Д.А., Токарев М.П.

ВЛИЯНИЕ АКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВИХРЕВЫМИ ЯВЛЕНИЯМИ НА СТРУКТУРУ ПОТОКА В МОДЕЛИ ГИДРОТУРБИНЫ 139
Суслов Д. А., Скрипкин С. Г., Шторк С. И.

ФЛУКТУАЦИИ СКОРОСТИ В НАПОРНОМ Y-ТРОЙНИКЕ 140
Федоренко В.А., Леманов В.В.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ PIV-МЕТОДА ДЛЯ ВЕРИФИКАЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБТЕКАНИЯ ТЕЛ С ДЕМПФИРУЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ 141
Чукалин А.В., Ковальногов В.Н., Петров А.В., Шеркунов В.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР КОЛЕБЛЮЩЕЙСЯ СТРУИ В ЩЕЛЕВОМ ЗАЗОРЕ 142
Шестаков М.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОТЫ ЩЕЛЕВОГО КАНАЛА НА ДИНАМИКУ ТЕЧЕНИЯ КОЛЕБЛЮЩЕЙСЯ СТРУИ 143
Шестаков М.В., Маркович Д.М.

ЭНЕРГИЯ ВРАЩЕНИЯ КАК МЕРА ИНТЕНСИВНОСТИ ЗАКРУТКИ ПОТОКА 144
Шишкин Н.Е.

ИЗУЧЕНИЕ АКТИВНЫХ И ПАССИВНЫХ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКОМ И ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСОМ В СТРУЯХ 145
Демиденко Н.В., Яковенко С.Н.

Секция 5 Процессы переноса при физико-химических превращениях, включая горение **.. 146**

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИИ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ТОПОЧНОЙ КАМЕРЕ КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА 147
Абрамов Н.В., Мальцев К.И., Гиль А.В.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИ СОГЛАСОВАННАЯ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГИБРИДНОЙ ДЕТОНАЦИИ ВОДОРОД-КИСЛОРОДНЫХ ВЗВЕСЕЙ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ В РАМКАХ ПРИВЕДЕННОЙ КИНЕТИКИ 148
Афанасенков А.А., Хмель Т.А.

СКОРОСТИ ДИФРАГИРУЮЩИХ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В ДВУМЕРНОМ КАНАЛЕ 149
Борискин А.А., Васильев А.А.

ПРИМЕНЕНИЕ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ САЖЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ ПИРОЛИЗЕ ЭЛЕМЕНТА ЛЕСНОГО ГОРЮЧЕГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ОЦЕНКИ РИСКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛЕСНОГО ПОЖАРА НА НАСЕЛЕНИЕ 150
Барановский Н.В., Вяткина В.А.

ИЗМЕРЕНИЕ И СТОХАСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ В КОНИЧЕСКО-ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ ГАЗИФИКАЦИИ ОПИЛА 151
Ершов М.И., Никитин А.Д., Масленников Г.Е., Тупоногов В.Г., Рыжков А.Ф.

О ВОЗМОЖНЫХ МЕХАНИЗМАХ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГОРЕНИЕ В ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ПОТОКЕ В КАНАЛЕ 152
Замураев В.П., Калинина А.П.

ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ СМЕСИ МИКРОСТРУИ ВОДОРОДА С РАЗЛИЧНЫМИ ГАЗАМИ 153
Козлов В.В., Литвиненко Ю.А., Шмаков А.Г., Павленко А.М.

КОРРЕКТИРОВКА ТЕМПЕРАТУРЫ ОБРАЗЦА В КАМЕРЕ ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ КИНЕТИКИ ОКИСЛЕНИЯ УГЛЕРОДА 154
Козлова М.А., Донской И.Г.

ЗАЖИГАНИЕ ЧАСТИЦ УГЛЯ С КОНТРОЛИРУЕМОЙ ВЛАЖНОСТЬЮ В УСЛОВИЯХ, СООТВЕТСВУЮЩИХ КАМЕРАМ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ 155
Косторева Ж.А., Омаров А.А., Сыродой С.В.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕВЫХ PUFF СТРУКТУР С ЯЧЕИСТЫМ МЕТАНО-ВОЗДУШНЫМ ПЛАМЕНЕМ 156
Дубнищев Ю.Н., Золотухина О.С., Леманов В.В, Шаров К.А., Лукашов В.В.

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ДИФФУЗИОННОГО ГОРЕНИЯ МИКРОСТРУЙ ВОДОРОДА 157
Тамбовцев А.С., Козлов В.В., Литвиненко Ю.А., Павленко А.М., Шмаков А.Г.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛО-МАССОПЕРЕНОСА ГАЗОПЫЛЕВЫХ РЕАГИРУЮЩИХ ПОТОКОВ 158
Пескова Е.Е., Снытников В.Н.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ САМОВОСПЛАМЕНЯЮЩИХСЯ КОМПОНЕНТОВ ТОПЛИВ 159
Плешко А.О., Глушков Д.О.

ДЕТОНАЦИОННОЕ СЖИГАНИЕ СТРАТИФИЦИРОВАННОГО ГАЗОВОГО ЗАРЯДА, КОНТАКТИРУЮЩЕГО С ВОЗДУХОМ 160

Прохоров Е.С.

ТЕПЛООБМЕН ХИМИЧЕСКИ АКТИВНОЙ СРЕДЫ СО СТЕНКАМИ ПРЯМОЙ ТРУБЫ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ 161
Пескова Е.Е., Снытников В.Н.

ГОРЕНИЕ МЕТАНА С ДОБАВЛЕНИЕМ МИКРОКАПЕЛЬ ВОДЫ В СЛАБОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ 162
А.В. Тупикин, В.М. Дулин, Д.К. Шараборин

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДИСПЕРСНОГО РАБОЧЕГО ТЕЛА ДЛЯ МАЛОЭМИССИОННОГО ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА 163
Федоров Р.В., Шепелев И.И., Малешина М.А., Карпов Д.А., Селезнев К.А.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ В ЛАМИНАРНОМ ПЛАМЕНИ БУНЗЕНА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ 164
Шараборин Д.К., Толстогузов Р.В., Савицкий А.Г., Дулин В.М.

Секция 6 Процессы в разреженных газах и плазме **165**

ЭЖЕКЦИЯ ПЫЛЕВОЙ ЧАСТИЦЫ С ПОВЕРХНОСТИ КАВЕРНЫ, ЗАПОЛНЕННОЙ ГАЗОМ 166
Быков Н.Ю., Захаров В.В., Керестень И.А., Никитин М.А., Образцов Н.В.

ОБРАЗОВАНИЕ МАЛЫХ КЛАСТЕРОВ В СВЕРХЗВУКОВЫХ СТРУЯХ, ИСТЕКАЮЩИХ В ВАКУУМ, ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ 167
Горбачев Ю.Е., Быков Н.Ю., Деринг Е.Д.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРАЩАТЕЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В СВЕРХЗВУКОВОМ КЛАСТИРОВАННОМ ПОТОКЕ 168
Деринг Е.Д., Дубровин К.А., Зарвин А.Е., Каляда В. В.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЕННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ 169
Аньшаков А.С., Домаров П.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ АНОМАЛЬНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧАСТИЦ КЛАСТИРОВАННОГО ПОТОКА СМЕШАННЫХ ГАЗОВ, ИНИЦИИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОНАМИ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ 170
Дубровин К.А., Зарвин А.Е., Мадирбаев В.Ж., Шарафутдинов Р.Г.

ЦИКЛ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССА КОНДЕНСАЦИИ ЧАСТИЦ НА ГАЗОДИНАМИКУ МОДЕЛИРУЕМОГО ПОТОКА 171
Зарвин А.Е., Яскин А.С., Каляда В.В., Художитков В.Э., Дубровин К.А., Деринг Е.Д.

ЯВЛЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ, КАК СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ ЦЕНТРАЛЬНОГО ТЕЛА МНОГОКАМЕРНОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ 172
Каун Ю.В., А.В. Колычев, П.А. Архипов.

ТРАВЛЕНИЕ ФТОРПОЛИМЕРНОГО ПОКРЫТИЯ, СИНТЕЗИРОВАННОГО МЕТОДОМ HW CVD, В ПЛАЗМЕ НИЗКОЧАСТОТНОГО ИНДУКЦИОННОГО РАЗРЯДА 173
Петрова А.В., Пинаев В.А., Хмель С.Я.

ВЛИЯНИЕ РАЗБАВЛЕНИЯ ГАЗА-ПРЕДШЕСТВЕННИКА ИНЕРТНЫМ ГАЗОМ НА СТРОЕНИЕ ПОКРЫТИЙ ПРИ ОСАЖДЕНИИ МЕТОДОМ HW CVD 174
Петрова А.В., Сафонов А.И.

ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЕК РАФИНИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ 175
Щукин В.Г., Константинов В.О., Шарафутдинов Р.Г.

ГАЗОСТРУЙНЫЙ MPCVD СИНТЕЗ АЛМАЗНЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ РАЗНЫХ ДАВЛЕНИЯХ В КАМЕРЕ ОСАЖДЕНИЯ 176
Емельянов А.А., Плотников М.Ю., Тимошенко Н.И., Юдин И.Б.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ПЛЕНКИ БУТАНОЛА СО СПУТНЫМ ПОТОКОМ ГАЗА ВНУТРИ СВЕРХЗВУКОВОГО СОПЛА 177
Ярыгин В.Н., Приходько В.Г., Ярыгин И.В.

ОБОБЩЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЛАЗМОТРОНОВ 178
Ярыгин В.Н.

Секция 7 Теплофизика микро- и наносистем **..... 179**

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СМАЧИВАЕМОСТИ ТЕКСТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ, ПОКРЫТЫХ ГРАФЕНОМ 180
Андрющенко В.А., Артишевский К.В.

ВЛИЯНИЕ РАСХОДА ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ НА ТЕМПЕРАТУРУ ТЕПЛОВОГО ФИЛЬТРА 1-Й СТУПЕНИ СИНХРОТРОНА «СКИФ» 181
Винокуров В.А., Винокуров В.В., Кабов О.А., Пуховой М.В.

ВЛИЯНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ В МИКРОКАНАЛАХ 182
Глуздов Д.С., Гатапова Е.Я.

ГЕНЕРАТОР МИКРОКАПЕЛЬ 183
Кабов О.А., Марчук И.В., Гришков В.А., Деревянников И.А., Сибиряков Н.Е., Кочкин Д.Ю., Быковская Е.Ф.

СТОХАСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА В ЖИДКОСТЯХ 184
Лежнев Е.В., Рудяк В.Я.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ ЛАУРИЛСУЛЬФАТА НАТРИЯ В ВОДНОМ РАСТВОРЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ВЗРЫВНОМ ВСКИПАНИИ СЖИЖЕННОГО ФРЕОНА R32 185
Марасанов Н.В., Климов Б.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАССЫ ВОДЫ НА ПРОЦЕСС ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ МЕТОДОМ ВЗРЫВНОГО ВСКИПАНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ФРЕОНА 32 186
Марасанов Н.В., Князьков В.А.

ГАЗОГИДРАТНЫЙ СПОСОБ ОПРЕСНЕНИЯ ВОДЫ 187
Мелешкин А.В., Климов Б.А.

ДИССОЦИАЦИЯ ГИДРАТА SF_6 СИНТЕЗИРОВАННОГО В ВОДНОМ РАСТВОРЕ С ЧАСТИЦАМИ SIO_2 188
Князьков В.А., Мелешкин А.В.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВСТРЕЧНЫХ СВЕРХЗВУКОВЫХ МИКРОСТРУЙ 189
Корепанов М.А., Королева М.Р., Митрюкова Е.А.

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ, ВЯЗКОСТЬ И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ НАНОЖИДКОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ВОДЫ И УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ НАНОЧАСТИЦ 190
Морозова М.А., Зайковский А.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В СЛИЯНИЕ КАПЛИЯ ЖИДКОСТИ НА НАГРЕВАЕМИЕ ТОНКИЙ ФОЛЬГЕ 191
Мурадов. Э.Б., Чеверда В.В.

О ТРАНСПОРТЕ ИОНОВ ВБЛИЗИ КРИСТАЛЛА НИОБАТА ЛИТИЯ В ПРОЦЕССЕ ПРОТОНИРОВАНИЯ 192
Демин В.А., Петухов М.И.

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЯЗКОСТИ И РЕОЛОГИИ НАНОЖИДКОСТЕЙ С ОДНОСТЕННЫМИ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ 193
Рудяк В.Я., Рафальская Т.А.

СОПОСТАВЛЕНИЕ И АНАЛИЗ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОЖИДКОСТЕЙ С УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ 194
Рудяк В.Я.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ПУЗЫРЬКА SF_6 195
Сластная Д. А., Вожаков И. С., Мелешкин А. В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЕВИТИРУЮЩИХ МИКРОКАПЕЛЬ КОНДЕНСАТА ВОДЫ НАД СМОЧЕННОЙ И СУХОЙ НАГРЕВАЕМЫМИ ПОДЛОЖКАМИ 196
Шатекова А.И., Зайцев Д.В.

Секция 8 Теплофизические свойства веществ и лучистый теплообмен **..... 197**

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКИХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Li-K-Pb..... 198
Агажанов А.Ш., Абдуллаев Р.Н., Хайрулин Р.А., Хайрулин А.Р.

УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОЕМКОСТЬ ЛЕЙЦИТА В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР 300–980 К..... 199
Самошкин Д.А., Агажанов А.Ш., Станкус С.В.

КРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ, КОЭФФИЦИЕНТЫ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НЕКОТОРЫХ АМИНОСПИРТОВ..... 200
Богатищева Н.С., Попов А.П., Никитин Е.Д., Галкин Д.А.

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ЖИДКОЙ И ГАЗОВОЙ ФАЗ МЕДИ ПРИ ВЫСОКИХ ПЛОТНОСТЯХ ЭНЕРГИИ..... 201
Боярских К.А., Хищенко К.В.

БЛОКИРОВКА КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛОВОГО ПОТОКА ЗА СЧЕТ ВДУВА ГАЗА В ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ..... 202
Ивашиненко М.О., Борисенко И.А., Нетелев А.В.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА АККОМОДАЦИИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЛОБОВОГО ТОРМОЗНОГО ЭКРАНА С НАБЕГАЮЩИМ ПОТОКОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМА ГЕНЕТИЧЕСКОГО ПОИСКА 203
И.А. Борисенко, А.В. Нетелев, М.О. Ивашиненко, А.В. Моржухина, М.О. Салосина.

ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЕТАЛЕЙ В ПОЛЕ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ УСКОРЕНИЙ 204
Лепешкин А.Р.

ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ВЛИЯНИИ НИЗКИХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ 205
Лепешкин А.Р.

ТЕПЛОЕМКОСТЬ РЫБЬЕГО ЖИРА ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ДАВЛЕНИЯХ 206
Мазанов С.В., Зарипов З.И., Накипов Р.Р., Аетов А.У.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В МОДЕЛИРОВАНИИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ МАГНИТНО-ИНЕРЦИАЛЬНОГО СИНТЕЗА..... 207
Кузенов В.В., Рыжков С.В.

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ СПЛАВА ЖЕЛЕЗО–НИКЕЛЬ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ..... 208
Середкин Н.Н., Хищенко К.В.

ТАЯНИЕ МУТНОГО ЛЬДА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИСКУССТВЕННЫМ ИСТОЧНИКОМ ИЗЛУЧЕНИЯ 209
Слепцов С.Д., Саввинова Н.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ 210
Усманов Б.А., Галеев Р.Р., Мусин А.А., Зиннатуллин Р.Р.

ЭНТАЛЬПИЯ И ТЕПЛОЕМКОСТЬ СПЛАВОВ Cs–Bi В ЖИДКОМ СОСТОЯНИИ 211
Хайрулин А.Р., Станкус С.В.

ТЕРМИЧЕСКИЕ И КАЛОРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАГНИЙ-ЛИТИЕВЫХ СПЛАВОВ С МАЛЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ЛИТИЯ 212
Абдуллаев Р.Н., Хайрулин А.Р., Самошкин Д.А., Козловский Ю.М., Станкус С.В.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИСТИРОЛА В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ПЛОТНОСТЕЙ И ТЕМПЕРАТУР..... 213
Хищенко К.В.

Секция 9 Теплофизические проблемы энергетики, энергоэффективность и энергосбережение **214**

УДЕЛЬНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ УГЛЕРОДНОГО ОСТАТКА ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ КОНВЕРСИИ СМЕСИ ТОРФА С ДРЕВЕСНЫМИ ОПИЛКАМИ 215
Берикболов А.К., Янковская Н.С., Мисюкова А.Д., Янковский С.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ ПОДОГРЕВА В ВИХРЕВЫХ ТРУБАХ РАЗЛИЧНОЙ ДЛИНЫ 216
Бумагин Д. А., Веретенников С. В.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НИЗКОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНОЛА НА КИНЕТИКУ ОБРАЗОВАНИЯ ГИДРАТОВ МЕТАНА ИЗ РАСТВОРА 217
Гец К.В., Жданов Р.К., Божко Ю.Ю., Белослудов В.Р.

ТЕПЛОВОЙ НАСОС ВМЕСТО ГРАДИРНИ 218
Гогонин И.И.

КИНЕТИКА И МЕХАНИЗМЫ ОКИСЛЕНИЯ ЖИДКОГО СВИНЦА ВЫСОКОПЛОТНЫМ ВОДОКИСЛОРОДНЫМ ФЛЮИДОМ 219
Гребенников А.П., Востриков А.А., Федяева О.Н.

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СЖИГАНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В МАЛОГАБАРИТНОЙ ТОПОЧНОЙ КАМЕРЕ 220
Алексеенко С.В., Дектерев А.А, Дектерев Ар.А., Кузнецов В.А., Тэпфер Е.С., Шадрин Е.Ю.

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ТОРЦЕВЫХ СТЕНОК НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЦИКЛОИДАЛЬНОГО РОТОРА 221
Дектерев Д.А., Дектерев Ар.А., Необъявляющий П.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЯГОВО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАЛОГО ЦИКЛОИДАЛЬНОГО РОТОРА В НАБЕГАЮЩЕМ ПОТОКЕ 222
Дектерев Д.А., Дектерев Ар.А., Платонов Д.В., Дектерев А.А.

ЭФФЕКТИВНАЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО БУРОГО УГЛЯ И ДРЕВЕСНОЙ ЩЕПЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОЧНЫХ СМЕСЕВЫХ ТОПЛИВНЫХ БРИКЕТОВ 223
Берикболов А.К., Янковская Н.С., Есин К.С., Янковский С.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ РЕКУПЕРАТОРА ТЕПЛОТЫ САЛОННОГО ВОЗДУХА ЭЛЕКТРОБУСА 224
Закиров А.Ф., Ермаков А.М., Салахов Р.Р.

ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВУТ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДРОБЛЕНИЯ КАПЛИ 225
Сыродой С.В., Замалтдинов Р.Р.

МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ПРИ НАЛИЧИИ ОСАДКОВ В ОБЛАСТИ УЛЬЯНОВСКОГО ВЕТРОПАРКА 226
В.Н. Ковальногов, Ю.А. Хахалев, М.И. Корнилова, О.В. Савелов, Д.С. Степанов.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СОВМЕСТНОГО СЖИГАНИЯ ТОЩЕГО УГЛЯ И ПРИРОДНОГО ГАЗА В ВИХРЕВОЙ ТОПКЕ С ВЕРХНЕРАСПОЛОЖЕННЫМ ВТОРИЧНЫМ ДУТЬЕМ 227
Красинский Д.В.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ, ГОРЕНИЯ И ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ КОМПОЗИТНОГО ТОПЛИВА ИЗ ОПИЛОК И АНТРАЦИТА 228
Кузнецов А.В., Шадрин Е.Ю.

МАССОПЕРЕНОС В ЛОКАЛЬНОЙ РАБОЧЕЙ ЗОНЕ С ГАЗОВЫМ ИНФРАКРАСНЫМ ИЗЛУЧАТЕЛЕМ И СИСТЕМОЙ ВОЗДУХООБМЕНА ПРИ НАЛИЧИИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ИСТОЧНИКА АНТРОПОГЕННОГО ГАЗА 229
Борисов Б.В., Кузнецов Г.В., Максимов В.И., Нагорнова Т.А., Салагаев С.О., Салихов Ф.Ю.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В МОДЕЛИ ПЕРИФЕРИЙНОЙ ОБЛАСТИ ТВС С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ 230
Лобанов П.Д., Светоносов А.И., Токарев М.П.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОТОКА И ВИБРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПРОДОЛЬНОМ ОБТЕКАНИИ ГИБКОГО СТЕРЖНЯ 231
Прибатурин Н.А., Евдокименко И.А., Лобанов П.Д., Светоносов А.С., Щепихин И.В.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОПОЧНОГО УСТРОЙСТВ ПРИ СЖИГАНИИ ПЫЛЕВИДНОГО ТОПЛИВА НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ..... 232
Мальцев К.И., Гиль А.В.

АНАЛИЗ ОРГАНИЧЕСКОГО ЦИКЛА РЭНКИНА ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ВОДЫ (70÷100 °C) 233
Степанов К.И., Садкин И.В., Мухин Д.Г., Алексеенко С.В.

ПОИСК РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ НИЗКОЭМИССИОННОГО СЖИГАНИЯ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ ПРИ ПОДАЧЕ ОКИСЛИТЕЛЕЙ-РАЗБАВИТЕЛЕЙ..... 234
Мухина М.А., Садкин И.С., Копьев Е.П., Шадрин Е.Ю.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНО-КОЛОНОЧНОГО ВОЗДУШНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА С КАПЕЛЬНЫМ ОРОШЕНИЕМ И ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ .. 235
Низовцев М.И., Летушко В.Н., Стерлягов А.Н.

НИЗКОКИПЯЩИЕ РАБОЧИЕ ЖИДКОСТИ В ОСНОВЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ..... 236
Огуречников Л.А.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ И АЭРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ДВИГАТЕЛЯХ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ..... 237
Гуреев В.М., Попов И.А., Гуреев М.В., Попов И.А., Жукова Ю.В., Чорный А.Д.

ОСОБЕННОСТИ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ КОМПОЗИЦИОННОГО ЖИДКОГО ТОПЛИВА..... 238
Вершинина К.Ю., Романов Д.С., Скорюпин В.В., Стрижак П.А.

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА СЖИГАНИЯ ЖИДКОГО НЕПРОЕКТНОГО ТОПЛИВА В РАСПЫЛИТЕЛЬНОМ ГОРЕЛОЧНОМ УСТРОЙСТВЕ С РЕГУЛИРУЕМОЙ ПОДАЧЕЙ ПЕРВИЧНОГО ВОЗДУХА..... 239
Шадрин Е.Ю., Мухина М.А., Садкин И.С., Копьев Е.П.

НАХОЖДЕНИЕ УСЛОВИЙ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА ГОРЕНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА ПРИ ЕГО РАСПЫЛЕ ПЕРЕГРЕТЫМ ВОДЯНЫМ ПАРОМ ПУТЕМ АНАЛИЗА РЕЖИМНЫХ КАРТ 240
Тарулин М.А., Копьев Е.П.

БАЗОВЫЕ МОДЕЛИ ТЯЖЕЛОАВАРИЙНОГО МОДУЛЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО КОДА ЕВКЛИД/V2 ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ А.З. РУ С ЖМТ..... 241
Усов Э.В., Чухно В.И., Климонов И.А., Озрин В.Д., Мосунова Н.А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ТРУБОПРОВОДНОЙ ИЗОЛЯЦИИ В КАМЕРЕ С ВРАЩАЮЩЕЙСЯ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ТРУБОЙ 242
Хуснутдинова М.А., Хайбуллина А.И., Синявин А.А., Хайруллин А.Р.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В НАСАДКАХ РЕКУПЕРАТИВНЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ 243
Шабалов С.Д., Горбачев М.В.

Секция 10 Тепломассоперенос в технологических процессах, решение экологических проблем, низкоуглеродная энергетика **..... 244**

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗИФИКАЦИИ БИОМАССЫ В ПОТОЧНОМ РЕЖИМЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ПИЛОТНОЙ УСТАНОВКЕ 245
Никитин А.Д., Абаимов Н.А., Ершов М.И.1, Симбирятин Л.В., Рыжков А.Ф.

УПРАВЛЕНИЕ ФОРМАМИ ФРОНТОВ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И ПОЛЯМИ ТЕМПЕРАТУРЫ В КРИСТАЛЛАХ В МЕТОДЕ ЧОХРАЛЬСКОГО 246
Бердников В.С., Винокуров В.В., Винокуров В.А., Кислицын С.А., Митин К.А.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ПЛОЩАДИ ПОВЕРХНОСТИ УГЛЕРОДА, ПОЛУЧЕННОГО ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ КОНВЕРСИИ СМЕСИ ТОРФА С ДРЕВЕСНЫМИ ОПИЛКАМИ 247

Берикболов А.К., Янковская Н.С., Мисюкова А.Д., Янковский С.А.

КАРБОНИЗАЦИЯ БИОМАССЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОРИСТЫХ РАДИАЦИОННЫХ ГОРЕЛОКУСТАНОВКЕ 248
Горшков А.С., Ларионов К.Б., Яковлев И.А., Мазной А.С.

УГЛЕКИСЛОТНАЯ КОНВЕРСИЯ МЕТАНА В МИКРОКАНАЛЬНОМ РЕАКТОРЕ 249
Димов С.В., Гасенко О.А.

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ НЕСКОЛЬКИХ ПРИПОДНЯТЫХ СТРУЙ В ПОПЕРЕЧНОМ ПОТОКЕ .. 250
Добросельский К.Г.

ЗАЖИГАНИЕ И ГОРЕНИЕ ПЕЛЛЕТИРОВАННЫХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ ОПИЛОК И РАЗЛИЧНЫХ ГРУПП ОТХОДОВ 251
Дорохов В.В., Няшина Г.С., Шведов Д.К.

РАЗРАБОТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕЦЕПТУР ЖИДКОСТЕЙ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА С ПОМОЩЬЮ НАНОДОБАВОК 252
Минаков А. В., Жигарев В. А., Неверов А.Л., Пряжников М. И., Скоробогатова А. Д.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ БИДИСПЕРСНОГО ОБЛАКА КАПЕЛЬ 253
Архипов В.А., Золоторёв Н.Н., Матвиенко О.В., Перфильева К.Г., Романдин В.И.

КАРБОНИЗАЦИЯ БИОМАССЫ В СРЕДЕ CO2 С ПОЛУЧЕНИЕМ АКТИВИРОВАННОГО УГЛЯ 254
Калтаев А.Ж., Ларионов К.Б., Губин В.Е.

МЕТОДЫ ЛОКАЛЬНОЙ И ГЛОБАЛЬНОЙ АППРОКСИМАЦИИ РЕШАТЕЛЯ ЗАДАЧИ РИМАНА 255
Королева М.Р., Тененев В.А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ГИДРОРАЗЫВУ ГРАНИТНЫХ ОБРАЗЦОВ 256
Лапин В.Н., Станчиц С.А., Филев Е.А.

ПРИМЕНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ МЕТОДОВ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДЛЯ АНАЛИЗА СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В ПРИЗЕМНОЙ ОБЛАСТИ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ 257
Мешкова В.Д., Дектерев Д.А., Шульженко П.Д., Дектерев А.А.

ФРАКЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ УГЛЯ И ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ ПОСЛЕ ИХ СОВМЕСТНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ 258
Мисюкова А.Д., Янковский С.А., Берикболов А.К., Есин К.С.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АБСОРБЦИОННЫХ БРОМИСТОЛИТИЕВЫХ И ХЛОРИСТОЛИТИЕВЫХ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ ПОВЫШАЮЩЕГО ТИПА В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ 259
Мухин Д.Г., Степанов К.И., Елистратов С.Л.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПНЕВМОИМПУЛЬСНОЙ ОЧИСТКИ ГАЗОХОДОВ ЭЛЕКТРОЛИЗНЫХ КОРПУСОВ АЛЮМИНИЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА ОТ ПЫЛЕВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ 260
Необъявляющий П.А., Дектерев А.А., Дектерев Д.А., Бойков Д.В., Платонов Д.В.

ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭНЕРГОУСТАНОВОК НА ОСНОВЕ ПОЛУОТКРЫТОГО ЦИКЛА НА УГЛЕКИСЛОМ ГАЗЕ 261
Садкин И.С., Щинников П.А.

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ФУНДАМЕНТОВ ЗДАНИЙ НА ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ 262
Низовцев М.И., Стерлягов А.Н.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ЗАЗОРА МЕЖДУ ПЛАСТИНАМИ МАСЛООХЛАДИТЕЛЯ НА ЕГО ЭФФЕКТИВНОСТЬ 263
Мищенкова О.В., Чернова А.А., Шигапова А.Р.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ УСЛОВИЙ ВЕТРОВОГО КОМФОРТА В РАЗЛИЧНЫХ ГОМОГЕННЫХ МОРФОТИПАХ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ 264
Шульженко П.Д., Мешкова В.Д., Дектерев А.А., Литвинцев К.Ю.

Секция 11 Прикладное и машинное обучение в теплофизике и энергетике **265**

О ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕЧИ ОБЖИГА ЦЕМЕНТНОГО КЛИНКЕРА С ПОМОЩЬЮ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ 266
Абдуракипов С.С., Бутаков Е.Б.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ДРОССА ПРИ ГОРЯЧЕМ ЦИНКОВАНИИ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА С ПОМОЩЬЮ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ 267
Абдуракипов С.С., Бутаков Е.Б.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПОТОКА В КАНАЛЕ 268
Бернар А., Ли Х., Яковенко С.Н.

ФИЗИЧЕСКИ ИНФОРМИРОВАННЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ: ПОДХОДЫ И ПРИЛОЖЕНИЯ 269
М.А. Братенков, Д.И. Сахаров, В.А. Травников, А.В. Серёдкин, В.А. Калинин, Р. И. Мулляджанов

ОДНОЭТАПНАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ КРОВОТОКА АНЕВРИЗМ БРЮШНОЙ АОРТЫ С ПОМОЩЬЮ ГИБРИДНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ 270
Епифанов Р.Ю., Карпенко А.А., Мулляджанов Р.И.

СУРРОГАТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ ПОМОЩИ ГРАФОВЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ 271
Травников В.А., Плохих И.А., Мулляджанов Р.И.

Секция 12 Материаловедение в задачах теплофизики и энергетики **272**

ИЗМЕНЕНИЕ ПРОВОДИМОСТИ ГРАФЕНА ПРИ ВЫСЫХАНИИ ВОДНЫХ КАПЕЛЬ НА ЕГО ПОВЕРХНОСТИ 273
Андрющенко В.А., Бетке И.А., Богомолова А.И.

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ЗАТРАВОЧНОГО СЛОЯ АМОРФНОГО ГЕРМАНИЯ НА ЗОЛОТО-ИНДУЦИРОВАННУЮ КРИСТАЛЛИЗАЦИЮ 274
Баранов Е.А., Замчий А.О., Константинов В.О., Самохвалов Ф.А., Родионов А.А., Старинская Е.М.

ГАЗОВЫЙ СЕНСОР НА ОСНОВЕ CVD-ГРАФЕНА 275
Богомолова А.И., Смовж Д.В., Баннов А.Г.

СОХРАНЕНИЕ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ МЕДИ, ПРОГРЕВАЕМОЙ В ВОЗДУШНОЙ АТМОСФЕРЕ, ПРИ ПОМОЩИ ГРАФЕНОВОГО ПОКРЫТИЯ 276
Бойко Е.В., Смовж Д.В., Бердников В.С., Михайлов А.В.

МЕХАНИЗМ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ СМАЧИВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ НАНОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ 277
Васильев М.М., Родионов А.А., Шухов Ю.Г., Старинский С.В.

ФОРМИРОВАНИЕ ОДНОМЕРНЫХ НАНОСТРУКУТР В ЭЛЕКТРОДУГОВОМ РАЗРЯДЕ 278
Зайковский А.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КАТАЛИТИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ В ЖИДКОСТИ 279
Каргина А.М., Старинский С.В.

РЕАКЦИОННАЯ ДИФФУЗИЯ И НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ СПЕКАНИИ ПОРОШКОВ Ti-Al-Fe-Fe_2O_3 280
Князева А.Г., Коростелева Е.Н., Анисимова М.А., Николаев И.О.

НАНЕСЕНИЕ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ СВЕРХТОНКИХ ПЛЕНОК ЗОЛОТА НА ПОДЛОЖКИ КРЕМНИЯ И КВАРЦА 281
Д.А. Колосовский, Т.М. Залялов, С.А. Пономарев, Ю.Г. Шухов, А.А. Морозов, С.В. Старинский

СОЗДАНИЕ ГИДРОФОБНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ АЛЮМИНИЯ КОМБИНАЦИЕЙ МЕТОДОВ АНОДИРОВАНИЯ И HW CVD 282
Ляпустин И.Н., Петрова А.В., Сафонов А.И.

ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ ТОЛЩИН СЛОЕВ АЛЮМИНИЯ И АМОРФНОГО КРЕМНИЯ

НА ПРОЦЕСС АЛЮМИНИЙ-ИНДУЦИРОВАННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ 283
Меркулова И.Е., Баранов Е.А., Замчий А.О., Константинов В.О., Самохвалов Ф.А., Родионов А.А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ CVD СИНТЕЗА ГРАФЕНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕАКЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА REAXFF 284
Рябов В.О., Андрющенко В.А., Глуздов Д.С.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ ЗОЛОТО-ИНДУЦИРОВАННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ АМОРФНО КРЕМНИЯ И АМОРФНОГО СУБОКСИДА КРЕМНИЯ 285
Самохвалов Ф.А., Смирнов Н.И., Родионов А.А., Старинский С.В.

Секция: Многофазные прецизионные технологии **286**

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРИМЕСЕЙ В РАСПЫЛЕННЫХ КАПЛЯХ ВОДЫ 287
Волков Р.С., Керимбекова С.А., Стрижак П.А.

ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРАТОВ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ГОРЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ЖИДКИХ ТОПЛИВ ИЗ ОТХОДОВ 288
Волков Р.С., Керимбекова С.А., Подгорная Е.Р., Стрижак П.А., Шлегель Н.Е.

ИЗУЧЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО КРИЗИСА ПУЗЫРЬКОВОГО КИПЕНИЯ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ТОНКОМ СЛОЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ HFE-7100 289
Жуков В.И., Павленко А.Н.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЯЗКОСТИ НА ДИСПЕРСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПРЕЯ ДВУХКАНАЛЬНОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ ФОРСУНКИ 290
Лебедев А.С., Лавронов К.Д.

ОДНОФАЗНОЕ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЕ ОРОШЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ 291
Назаров А.Д., Миськив Н.Б., Серов А.Ф., Мамонов В.Н.

ПЛАЗМЕННАЯ ЭКРАНИРОВКА ПРИ НАНОСЕКУНДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ КРЕМНИЯ 292
Родионов А.А., Старинский С.В., Шухов Ю.Г.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ КАПЕЛЬ МАЛОГО РАЗМЕРА В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПОТОКАХ 293
Рябов М.Н., Гобызов О.А., Бильский А.В.

ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ БИФИЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ПРОЦЕССЫ САМООРГАНИЗАЦИИ КОЛЛОИДНЫХ ЧАСТИЦ ПРИ ИСПАРЕНИИ КАПЛИ НАНОЖИДКОСТИ 294
Старинская Е.М., Миськив Н.Б., Родионов А.А., Старинский С.В.

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА ЖИДКОСТЕЙ ОТ НЕРЕГЛАМЕНТИРОВАННЫХ ПРИМЕСЕЙ 295
Антонов Д.В., Стрижак П.А.

ПРИМЕНЕНИЕ ПЛИФ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПЛАМЕНИ: МЕТОДОЛОГИЯ И АНАЛИЗ ДАННЫХ 296
Толстогузов Р.В., Шараборин Д.К., Савитский А.Г., Пономарев А.А., Дулин В.М.

ИК-ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ КИПЕНИЯ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЛОЕ HFE-7100 НА МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ 297
Швецов Д.А., Павленко А.Н., Жуков В.И., Назаров А.Д., Михайлов А.В.

Секция, посвященная юбилею **В.И. Терехова** **298**

ВИХРЕВАЯ ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА. НЕОКОНЧЕННАЯ ИСТОРИЯ. 299
Исаев С.А.

МАССОПЕРЕНОС В ЛОКАЛЬНОЙ РАБОЧЕЙ ЗОНЕ С ГАЗОВЫМ ИНФРАКРАСНЫМ ИЗЛУЧАТЕЛЕМ И СИСТЕМОЙ ВОЗДУХООБМЕНА ПРИ НАЛИЧИИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ИСТОЧНИКА АНТРОПОГЕННОГО ГАЗА 300
Борисов Б.В., Кузнецов Г.В., Максимов В.И., Нагорнова Т.А., Салагаев С.О., Салихов Ф.Ю.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО КОМФОРТА В СИСТЕМЕ «ЧЕЛОВЕК-ЗАЩИТНАЯ ОБОЛОЧКА-ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА» 301
Чорный А.Д.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ГАЗОКАПЕЛЬНОМ ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКЕ В ТРУБЕ 302
Пахомов М.А., Терехов В.И.

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛО И МАССООБМЕНА В ПРИСТЕННЫХ ПОТОКАХ С ФАЗОВЫМИ И ХИМИЧЕСКИМИ ПРЕВРАЩЕНИЯМИ 303
Лукашов В.В.

СОПОСТАВЛЕНИЕ И АНАЛИЗ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ НАНОЖИДКОСТЕЙ С УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ 304
Рудяк В.Я.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЕНТИЛЯЦИИ ТЕСТОВОГО ПОМЕЩЕНИЯ 305
Иванов Н.Г., Тельнов Д.С., Засимова М.А.

ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В ВОЗДУХО-ВОЗДУШНЫХ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКАХ 306
Низовцев М.И.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОКУСИРОВКИ ТЕЧЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ ЛОКАЛЬНОЙ 307
Чохар И.А., Спотарь С.Ю.

ТЕПЛОМАССООБМЕН В ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ СИСТЕМАХ КОСВЕННО-ИСПАРИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ 308
Горбачев М.В.

СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕН В КАНАЛЕ С РЯДОМ ТРАНШЕЙНЫХ ЛУНОК 309
Ян Лун Н., Терехов В.И.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ПОТОКА В ПРЯМОУГОЛЬНОМ КАНАЛЕ 310
Назаров Н.А., Герасимов А.С., Терехов В.В., Терехов В.И.

СОДЕРЖАНИЕ 311

Сайт конференции

НКТМ РАН

НАУЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ
ГРУППА КОМПАНИЙ