

НКТМ РАН

ИГиЛ

N*

НГТУ НЭТИ

МГИ

РНФ

V Всероссийская научная конференция с элементами школы молодых учёных

ТЕПЛОФИЗИКА и ФИЗИЧЕСКАЯ ГИДРОДИНАМИКА

Ялта, Республика Крым, отель "Ливадийский"

13-20 сентября 2020 г.

Научная молодёжная школа

ТЕПЛОФИЗИКА и ФИЗИЧЕСКАЯ ГИДРОДИНАМИКА: СОВРЕМЕННЫЕ ВЫЗОВЫ

Ялта, Республика Крым, отель "Ливадийский"

13-19 сентября 2020 г.

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Сибирское отделение РАН

Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН

Российский национальный комитет по тепломассообмену

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет

Новосибирский государственный технический университет

Морской гидрофизический институт РАН

Российский научный фонд

Научная молодёжная школа проводится при финансовой поддержке
Российского научного фонда
грант № 19-79-30075

Сибирское отделение РАН

Отделение энергетики, машиностроения,
механики и процессов управлении РАН

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН
Национальный исследовательский Новосибирский государственный университет
Новосибирский государственный технический университет

V Всероссийская научная конференция
с элементами школы молодых учёных

ТЕПЛОФИЗИКА и ФИЗИЧЕСКАЯ ГИДРОДИНАМИКА

Ялта, Республика Крым, отель «Ливадийский»
13–20 сентября 2020 г.

Научная молодёжная школа

ТЕПЛОФИЗИКА И ФИЗИЧЕСКАЯ ГИДРОДИНАМИКА: СОВРЕМЕННЫЕ ВЫЗОВЫ

Ялта, Республика Крым, отель «Ливадийский»
13–19 сентября 2020 г.

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Новосибирск 2020

УДК 532:533:534:535:536:537

Сборник содержит тезисы докладов V Всероссийской конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика» (ТФГ2020) с элементами школы молодых ученых и научной молодёжной школы «Теплофизика и физическая гидродинамика: современные вызовы». Конференция является продолжением серии всесоюзных конференций молодых исследователей, проводимых при участии Института теплофизики СО РАН с 70-х годов XX века. В этом году конференция проходит в г. Ялта. Организаторами конференции выступают Сибирское отделение Российской академии наук, Национальный комитет по тепло- и массообмену РАН, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе, Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева, Новосибирский государственный университет, Новосибирский государственный технический университет, Морской гидрофизический институт РАН. Целью конференции является обсуждение современных задач в области теплофизики и гидрогазодинамики, поиск путей их решения, а также подготовка научного кадрового резерва высокой квалификации и привлечение молодых ученых к наиболее актуальным исследованиям. В сборник включены тезисы докладов участников конференции и школы молодых учёных по следующим направлениям: теплообмен и гидродинамика в однофазных средах, гидродинамика и тепломассообмен в многофазных системах, фазовые переходы, гидрогазодинамика реагирующих сред, детонационные процессы, численные методы в теплофизике и физической гидрогазодинамике, методы и средства теплофизического и гидрогазодинамического эксперимента, теплофизические свойства веществ и новые материалы, тепломассообмен и гидродинамика на микро- и наномасштабах, электрофизические явления в газовых и жидких средах, теплообмен и гидродинамика в технологических процессах и защита окружающей среды. Доклады, представленные в рамках молодёжной научной школы, выделены заголовком в верхнем колонтитуле. Сборник тезисов может быть полезен студентам вузов, аспирантам и научным сотрудникм соответсвующих специальностей.

Председатель
Маркович Д.М., академик РАН

Учёный секретарь
Макаров М.С., к.ф.-м.н.

Заместители
Головин С.В., профессор РАН, д.ф.-м.н.
Марчук И.В., профессор РАН, д.ф.-м.н.

Технический комитет
Смовж Д.В., к.ф.-м.н.
Роньшин Ф.В., к.ф.-м.н.
Миськив Н.Б.
Серяпин А.В.
ООО «МКС» конгресс-организатор

Научный комитет
Алексеенко С.В., академик РАН (ИТ СО РАН, Новосибирск)
Батаев А.А., профессор, д.т.н. (НГТУ, Новосибирск)
Васильев А.А., профессор, д.ф.-м.н. (ИГиЛ СО РАН, Новосибирск)
Губайдуллин А.А., профессор, д.ф.-м.н. (ИТПМ СО РАН, Тюмень)
Дёмышев С.Г., д.ф.-м.н. (МГИ РАН, Севастополь)
Елистратов С.Л., доцент, д.т.н. (НГТУ, Новосибирск)
Ерманюк Е.В., д.ф.-м.н. (ИГиЛ СО РАН, Новосибирск)
Исаев С.А., профессор, д.ф.-м.н. (СПбГУГА, Санкт-Петербург)
Кабов О.А., профессор, д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)
Кедринский В.К., профессор, д.ф.-м.н. (ИГиЛ СО РАН, Новосибирск)
Коротаев Г.К., член-корреспондент РАН (МГИ РАН, Севастополь)
Кубряков А.И., д.ф.-м.н. (МГИ РАН, Севастополь)
Кузнецов В.В., профессор, д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)
Куйбин П.А., д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)
Куперштох А.Л., профессор, д.ф.-м.н. (ИГиЛ СО РАН, Новосибирск)
Леонтьев А. И., академик РАН (МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва)
Павленко А.Н., чл.-корр. РАН (ИТ СО РАН, Новосибирск)
Прибатурин Н.А., чл.-корр. РАН (ИТ СО РАН, Новосибирск)
Прууэл Э.Р., к.ф.-м.н. (ИГиЛ СО РАН, Новосибирск)
Пухначёв В.В., член-корреспондент РАН (ИГиЛ СО РАН Новосибирск)
Рыжков А.Ф., профессор, д.т.н. (УрФУ, Екатеринбург)
Самодуров А.С., д.ф.-м.н. (МГИ РАН, Севастополь)
Смовж Д.В., к.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)
Станкус С.В., профессор, д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)
Терехов В.И., профессор, д.т.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)
Терехов В.В., профессор РАН, д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)
Титов В.М., академик РАН (ИГиЛ СО РАН, Новосибирск)
Токарев М.П., к.т.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)
Федорук М.П., академик РАН (НГУ, Новосибирск)
Хабахпашев Г.А., д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)
Цвелодуб О.Ю., профессор, д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)
Чернов А.А., профессор РАН, д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)

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

ISBN 978-5-89017-065-1 © Институт теплофизики СО РАН, 2020



Научная молодёжная школа

ТЕПЛОФИЗИКА и ФИЗИЧЕСКАЯ ГИДРОДИНАМИКА: СОВРЕМЕННЫЕ ВЫЗОВЫ

ПЛЕНАРНЫЕ ЛЕКЦИИ



УДК 616-036.2

АНАЛИЗ СТАДИЙ ЭПИДЕМИИ КОВИД-19 НА ОСНОВЕ ВАРИАЦИОННЫХ МЕТОДОВ

Деревич И.В., Панова А.А.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

e-mail: DerevichIgor@bmstu.ru

Пандемия вирусной инфекции Ковид-19 представляет реальную угрозу для современной цивилизации. Практический интерес представляет разработка методов прогноза динамики развития эпидемии. Существующие эмпирические модели типа SIR (susceptible – восприимчивый, infected – инфицированный, recovered – восстановшийся) не дают надежных прогнозов численности инфицированных. В работе представлен новый метод расчета инфицированных и находящихся в активной фазе заболевания на основе вариационного метода. Выделяются три универсальные стадии эпидемии, которые реализуются во всех странах мира. На первой стадии поток мигрантов в страну приводит к начальному росту числа инфицированных. Затем на этой стадии происходит неуправляемое развитие эпидемии. Вторая стадия – карантин регулирует число инфицированных, которое определяет последующую динамику эпидемии. На третьей стадии возможно два сценария. Во многих странах Европы третья стадия приводит к вырождению вируса и затуханию эпидемии. Однако, социальная активность населения (США) или контакт с населением других стран с большим числом инфицированных (Израиль) может привести к вторичному интенсивному развитию эпидемии. В Индии и Бразилии стадия карантина не была реализована и результатом является неуправляемый рост эпидемии.

В работе анализ всех трех стадий проведен в рамках единого подхода, основанного на анализе скорости роста числа инфицированных. Система дифференциальных уравнений релаксационного типа для параметров скорости роста отражает время перехода между стадиями. Константы модели определяются путем минимизации специального функционала, отражающего микробиологические законы репликации вируса и консервативные особенности социального поведения населения стран. Обнаружено, что на каждой стадии существует маргинальное значение параметра скорости роста, к которому в течении стадии релаксирует актуальное значение. Это обуславливает возможность предсказания ожидаемого числа инфицированных на срок не менее пятнадцати дней. Число вылечившихся от Ковид-19 аппроксимируется распределением вероятности Эрланга из теории массового обслуживания.

Представлены результаты численного анализа развития эпидемии Ковид-19 в ряде стран Европы, Соединенных Штатах Америки, Бразилии, Индии, Израиля.

Численный анализ свидетельствует, что особенности развития эпидемии существенно зависят от национальных особенностей поведения населения стран и эффективности административного управления.

Германия являет пример успешной борьбы с эпидемией Ковид-19. Национальная организованность после введения карантина привела к монотонному снижению скорости инфицирования. В России после введения карантина число инфицированных увеличилось почти в двадцать раз. В настоящее время ослабление активности вирусной инфекции приводит в России к монотонному снижению скорости роста числа зараженных (рис. 1).

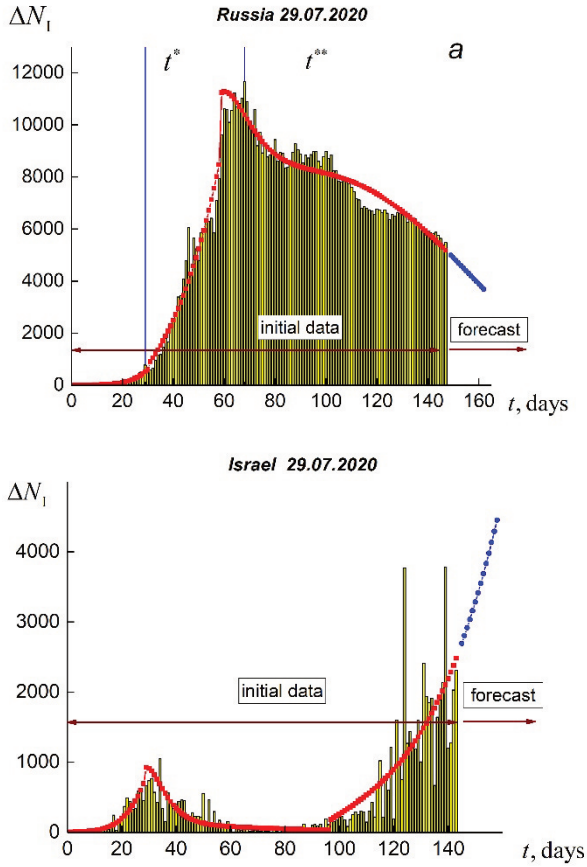


Рис.1. Ежедневный прирост числа инфицированных в России и Израиле. Столбики – экспериментальные данные; кривые – результаты численного моделирования

На рис. 1 также представлен сценарий вторичного всплеска эпидемии в Израиле после практически полной победы над эпидемией Ковид-19. Малый рост числа инфицированных в Израиле сменился существенной скоростью развития эпидемии. Вероятно, это связано с заметным увеличением числа инфицированных, прибывающих в Израиль из близлежащих стран.

В работе на основе вариационного принципа представлен новый метод прогноза численности зараженных вирусом Ковид-19.

Работа поддержана РФФИ (грант № 20-08-01061)

УДК 621.9

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ЛУНОЧНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ВИХРЕВОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭНЕРГЕТИКЕ И МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ

Исаев С.А.[1,5], Попов И.А.[2], Михеев Н.И.[3], Гувернюк С.В.[4], Никущенко Д.В.[5], Судаков А.Г.[1]

[1] Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации
[2] Казанский национальный исследовательский университет им. А.Н. Туполева – Казанский авиационный институт
[3] Казанский научный центр РАН
[4] НИИ Механики МГУ, 119192, Россия, Москва
[5] Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

e-mail: isaev3612@yandex.ru

Интенсификация теплообмена поверхностными вихрегенераторами – лунками уже много лет является одной из актуальных областей современной теплофизики, привлекающей внимание мирового научного сообщества [1,2]. Развитие луночных технологий на основе наклоненных овально-траншейных лунок (ОТЛ) обусловило открытие аномальной интенсификации отрывного ламинарного и турбулентного течения и теплообмена в облуненных узких каналах [3-5], связанных с многократным увеличением модуля отрицательного трения и теплоотдачи в лунке в отношении к соответствующим характеристикам на гладкой стенке канала. К тому же открыто явление ускорения потока в узком облуненном канале с увеличением максимальной скорости в нем в 1.4 – 1.5 раза по сравнению в плоскопараллельным каналом.

В данном исследовании выполняется экспериментальное подтверждение обнаруженных эффектов на установках НИИ Механики МГУ, КНИТУ-КАИ и КазНЦ РАН.

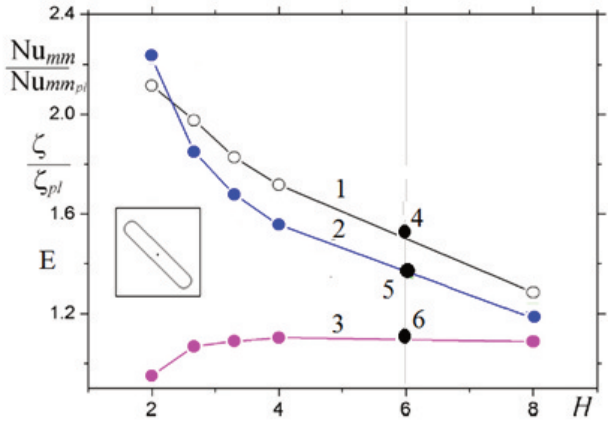


Рис. 1. Зависимость относительной теплоотдачи Nu_{mm}/Nu_{mmpl} (1), относительного прироста гидравлического сопротивления ζ/ζ_{pl} (2) и теплогидравлической эффективности $E=(Nu_{mm}/Nu_{mmpl})/(\zeta/\zeta_{pl})$ (3) по длине периодической секции с овально-траншейными выемками от относительного шага нанесения выемок H. Точки 4,5,6 – соответственно относительная теплоотдача, прирост гидравлического сопротивления и теплогидравлическая эффективность, полученная в ходе эксперимента. Индекс pl соответствует характеристикам плоскопараллельного канала.

В частности, рассмотрен стабилизированный участок конвективного теплообмена в виде периодической секции канала с нанесенными на нагреваемую стенку однорядными наклоненными ОТЛ. На проточных входной и выходной границах секции задаются периодические граничные условия. На стенках выполняются условия прилипания. Нижняя, облуненная и верхняя, плоская стенки изотермические, а боковые стенки теплоизолированные. Температура нижней стенки 303К, а верхняя стенка поддерживается при температуре 293К, принятой в качестве характерной температуры. Высота канала выбрана в качестве линейного масштаба. Ширина канала равна 9, а длина периодической секции – 8. ОТЛ глубиной 0.25, наклоненные под углом 65°, имеют ширину 1.05 и длину 7.05. Радиус скругления кромок 0.21. Шаг H между лунками в однорядном рельефе варьируется от 2 до 8. На нижней стенке выделяется контрольный участок размеров 8×8, на котором определяются интегральные характеристики, в том числе суммарное число Нуссельта Nu_{mm}. Как видно из рис.1, численные прогнозы хорошо согласуются с данными экспериментов.

Список литературы

1. Вихревые технологии для энергетики / Леонтьев А.И., Алексеенко С.В., Волчков Э.П. и др. Под ред. Леонтьева А.И.. М.: Издательский дом МЭИ. 2017. 350 с.
2. Rashidi S., Hormozi F., Sunden B. and Mahian O. Energy saving in thermal energy systems using dimpled surface technology. A review on mechanisms and applications // Applied Energy. 2019. V. 250. P. 1491–1547.
3. Isaev S.A., Leontiev A.I., Milman O.O., Popov I.A., Sudakov A.G. Influence of the depth of single-row oval-trench dimples inclined to laminar air flow on heat transfer enhancement in a narrow micro-channel // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2019. V. 134. P. 338–358.
4. Isaev S., Gritckevich M., Leontiev A., Popov I. Abnormal enhancement of separated turbulent air flow and heat transfer in inclined single-row oval-trench dimples at the narrow channel wall // Acta Astronautica. 2019. V. 163 A. P. 202–207.
5. Isaev S.A., Gritckevich M.S., Leontiev A.I., Milman O.O., Nikushchenko D.V. Vortex enhancement of heat transfer and flow in the narrow channel with a dense packing of inclined one-row oval-trench dimples // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2019. V. 145 (118737). P. 1–13.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№18-01-00210, 18-58-52005, теоретический анализ) и РНФ (грант №19-19-00259, экспериментальное обоснование)

УДК 532.517

ИСПАРЕНИЕ, КИПЕНИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ СУХИЕ ПЯТНА В ТОНКИХ ЖИДКИХ ПЛЕНКАХ ПРИ ИНТЕНСИВНОМ НАГРЕВЕ

Кабов О.А.

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

e-mail: kabov@itp.nsc.ru

Одной из важнейших проблем теплофизики в настоящее время является охлаждение микроэлектронного оборудования. Компьютерные чипы могут включать более 20 миллиардов транзисторов, имеющих размер порядка 7 нм. Средняя плотность теплового потока на чипах коммерчески доступных компьютеров и других электронных устройств в настоящее время составляет до 200-300 Вт/см^2. В локальных участках от 100 мкм^2 до нескольких квадратных миллиметров плотность теплового потока достигает значений 1 кВт/см^2 и выше. Существует три «классических» метода теплоотвода от локализованных источников высокой интенсивности: 1) кипение в микроканалах, 2) спрейное охлаждение и 3) микроструйное охлаждение. Автором доклада был предложен четвертый метод эффективного охлаждения, при котором отвод тепла обусловлен интенсивным испарением тонкой жидкой пленки, движущейся в плоском микро- миниканале под действием потока газа [1, 2]. Проведены систематические исследования гидродинамики и кризиса теплообмена в расслоенном течении при нагреве от источника тепла 1x1 см^2 [3-6], (Рис.1).

Исследования показали возможность отведения тепловых потоков плотностью до 1кВт/см^2 с учетом потерь тепла в атмосферу и пластину, в которую вмонтирован нагреватель. Система может устойчиво работать в широком диапазоне изменения высоты канала (0.17-2.00 мм) и углов наклона канала к горизонту (0-360°). Установлено, что с ростом теплового потока суммарная площадь крупных сухих пятен, вызванных термокапиллярным разрывом, на нагревателе увеличивается, но при достижении определенной температуры поверхности нагревателя (≈100°C) площадь сухих пятен начинает уменьшаться. При этом суммарная длина контактной линии газ- жидкость- твердое тело увеличивается с увеличением теплового потока и перед кризисом достигает максимального значения. При помощи высокоскоростной визуализации (100000 кадров в секунду) было установлено массовое образование сухих пятен другого типа (размер порядка 100 - 600 мкм). Установлено, что при тепловом потоке 450 Вт/см^2 на поверхности нагревателя (1 см^2) может образовываться и замываться более 200000 сухих пятен в секунду, Рис.2. Скорость контактной линии при образовании сухого пятная достигает значения 10 м/с. Процесс обеспечивает высокую среднюю интенсивность теплообмена до 250 000 Вт/м^{2}К (с учетом потерь тепла), что связано с аномально высокой интенсивностью испарения в области динамической линии контакта [7,8]. Измеренные величины критических тепловых потоков и максимальных коэффициентов теплоотдачи по данным [9] находятся в пределах максимальных значений полученных для упомянутых выше трех классических типов систем охлаждения 0.91 – 1.8 кВт/см^2 и 83.8 – 280 кВт/м^{2}К, соответственно.

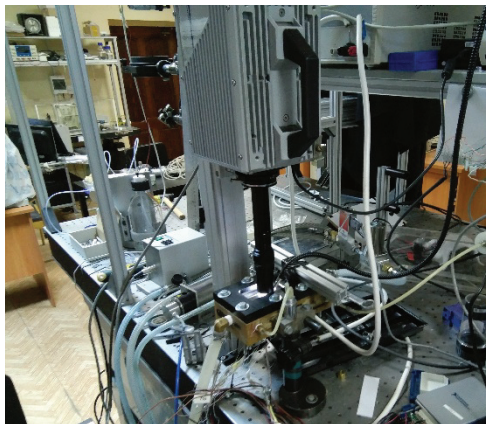


Рис. 1. Экспериментальный стенд.

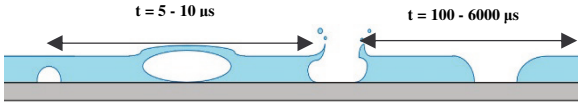


Рис. 2. На нагревателе 1 см^2 может формироваться и замываться 200000 сухих пятен в секунду.

Список литературы

1. Kabov O.A., Kuznetsov V.V., Marchuk I.A., Pukhnachov V.V., Chinnov E.A., Regular structures at thermocapillary convection in a driving liquid layer, Poverkhnost, rentgenovskie, sinkhronnie i neitronnie issledovanija, No. 5, pp. 84–90, 2001.
2. Kabov, O.A., Kuznetsov, V.V., Legros, J.-C., Heat transfer and film dynamic in shear-driven liquid film cooling system of microelectronic equipment. In: Proc. II Int. Conf. on Microchannels and Minichannels, Rochester, pp. 687–694, 2004.
3. Kabov O.A., Lyulin Yu.V., Marchuk I.V. and Zaitsev D.V., Locally heated shear-driven liquid films in microchannels and minichannels, Int. Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 28, p. 103–112, 2007.
4. Kabov O.A., Zaitsev D.V., Cheverda V.V., Bar-Cohen A., Evaporation and flow dynamics of thin, shear-driven liquid films in microgap channels, Experimental Thermal and Fluid Science, 35, 825, 2011.
5. O. Kabov, D. Zaitsev, E. Tkachenko. Interfacial thermal fluid phenomena in shear – driven thin liquid films. Proceedings of the 16th International Heat Transfer Conference, IHTC-16, 2018, Beijing.
6. Zaitsev D. V., Tkachenko E.M. Study of total heat losses in experiments with shear-driving liquid films in a mini-channel with intense heating // Journal of Physics: Conference Series. -Volume 1369 (012058), 2019.
7. Kabov O. A., Zaitsev D.V., Kirichenko D.P., Ajaev V.S. Interaction of levitating microdroplets with moist air flow in the contact line region // Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering, Vol. 21. № 2. pp. 60-69, 2017.
8. Ajaev, V. S., & Kabov, O. A. Heat and mass transfer near contact lines on heated surfaces. International Journal of Heat and Mass Transfer, 108, 918-932, 2017.
9. Khandekar S, Sahu G, Krishnamurthy M, Gatapova E, Kabov O, Hu R, Luo X, Zhao L. Cooling of High-Power LEDs by Liquid Sprays: Challenges and Prospects. Applied Thermal Engineering. 2020.

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (номер проекта 19-08-01235)

УДК 536.423:536.4.033

НЕРАВНОВЕСНЫЕ И ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ И ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЯХ В ГАЗОЖИДКОСТНЫХ СИСТЕМАХ

Кузнецов В.В.

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

e-mail: vladkuz@itp.nsc.ru

Одной из основных проблем, сдерживающих применение компактных энергетических установок в различных областях техники, является недостаточная изученность физических механизмов неравновесных и волновых процессов при фазовых и химических превращениях в газожидкостных системах, возникающих в условиях предельных тепловых и массовых потоков [1]. В данной работе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований многомасштабной структуры течений и межфаз- ного тепломассообмена при высокоинтенсивных фазовых и химических превращениях в газожидкостных системах и их использование в современных технологиях высокоинтенсивных систем охлаждения, микроэлектромеханических систем МЭМС на основе управляемого распада жидкости, реакторах- теплообменниках водородной энергетики и аппаратах получения синтетического жидкого топлива.

Рассмотрены многомасштабные процессы в парожидкостной среде при ударно-волновом воздействии, приводящем к высокой интенсивности межфазного тепломассопереноса на микроуровне и формированию крупномасштабных структур в области фазового перехода. Установлены характеристики ударной конденсации, возникающей при распространении волн давления, определен диапазон массовых паросодержаний, в котором поток является неустойчивым по отношению к крупномасштабным возмущениям конечной амплитуды. Построена физическая модель ударной конденсации в условиях больших ускорений потока, что позволяет прогнозировать аварии в трактах энергетических устройств, вызванные усилением волн давления. Выполнено комплексное исследование динамики волновых процессов в метастабильной жидкости при разрыве трубопроводов и аварийной разгерметизации сосудов. Определены закономерности волнового распада метастабильной жидкости в волне разрежения, получены данные о развитии поверхностных структур в области неравновесного фазового перехода. Установлено, что наиболее достоверным механизмом поверхностного распада жидкости в данных условиях является возникновение потока пересыщенного пара с последующей пульсирующей конденсацией, что обуславливает неравномерность динамического воздействия на межфазную поверхность.

Установлены закономерности взрывного кипения метастабильной жидкости на микронагревателе при импульсном тепловом воздействии, направленные на обоснование МЭМС на основе управляемого распада жидкости. С использованием оригинальной оптической методики установлены характеристики пузырькового распада широкого класса жидкостей и смесевых композиций при скорости роста температуры до 900 МК/с. Разработан метод расчета самосогласованного зародышеобразования и роста паровых пузырей в наведённом ими поле давления. Рост пузырей в окрестности спинодали рассмотрен с учетом сжимаемости жидкости, неоднородности поля температуры и неравновесности фазового перехода. Проведены экспериментальные и численные исследования взрывного кипения для гладкого и наноструктурированного нагревателя, разработаны методы управления взрывным фазовым переходом.

Применительно к разработке микроканальных систем отвода тепла от теплонапряженных зон энергетического оборудования и электронных устройств установлены физические механизмы и разработан метод расчета теплообмена при кипении недогретой и насыщенной жидкости в условиях вынужденной конвекции, учитывающий совместно вклад двухфазной конвекции, подавления пузырькового кипения и испарения волновой пленки жидкости. Обоснованы методы повышения критической тепловой нагрузки для кипения в микроканальных системах охлаждения. Для расчета теплообмена при испарении и конденсации в пластинчато-ребристых теплообменниках развита математическая модель, основанная на выделении течения жидкости в менисках и волнового пленочного течения на стенках канала. Численно определены условия формирования сухих пятен и увеличения коэффициента теплоотдачи в окрестности контактной линии при испарении.

Новым направлением в химической технологии является применение компактных микрореакторов. Разработаны микрокаталитические реакторы, основанные на применении микроструктурного катализатора для проведения синтеза Фишера-Тропша, позволяющие получать высокомолекулярные углеводороды из синтез-газа. Установлена кинетика и полнота реакций конверсии для микроструктурных катализаторов низкотемпературного синтеза Фишера-Тропша в условиях спутного течения газа и жидкости, и высокотемпературной конверсии природного газа. Изучены механизмы и разработаны методы расчета химических превращений при неравновесной паровой конверсии углеводородов в микроструктурированных реакторах-теплообменниках, выявлены условия высокой конверсии исходных продуктов в синтез-газ с повышенным содержанием водорода.

Список литературы

1. Kuznetsov V.V. Heat and mass transfer with phase change and chemical reactions in microscale // Proc. Int. Heat Trans. Conf. IHTC14. Washington, D.C. 2010. P. 225701.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН (А17-117022850026-8) и за счет гранта Российского Научного Фонда (проект №16-19-10519-П)

УДК 530.145.83, 536.932, 538.941

КВАНТОВАЯ ТУРБУЛЕНТНОСТЬ: ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Немировский С.К.[1,2]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
2 Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

e-mail: nemir@itp.nsc.ru

Термин «квантовая турбулентность» (QT) объединяет широкий класс явлений, при которых в квантовых жидкостях возникает хаотический набор струнообразных вихревых нитей (вихревой клубок), который оказывает существенное влияние на различные физические свойства. Квантовая турбулентность проявляется по-разному в зависимости от физической ситуации и варьируется от квазиклассической турбулентности в текущих жидкостях до термодинамически равновесного набора петель при фазовом переходе. Статистические конфигурации вихревых клубков, конечно, различны, скажем, в случаях текущего или вращающегося гелия, но во всех физических ситуациях возникают очень похожие теоретические и численные проблемы. Кроме того, довольно схожие ситуации возникают в других областях физики, где в системе возникает хаотический набор одномерных струнообразных топологических дефектов, таких как космические струны, или линейные дефекты в твердых телах, или линии “темноты” в нелинейных световых полях. Между этими научными дисциплинами, которые сильно отличаются друг от друга во многих отношениях, существует взаимопроникновение идей и методов. Основная цель предложенного доклада – собрать воедино некоторые из наиболее обсуждаемых результатов по квантовой турбулентности, сосредоточив внимание на аналитических и численных исследованиях. Мы изложим ряд результатов по общей теории квантовой турбулентности, которые направлены на описание свойств хаотической конфигурации вихря, начиная с динамики вихря. Кроме того, мы вставляем ряд конкретных вопросов, которые важны как для всей теории, так и для различных приложений.

Вторая часть доклада посвящена теории, описывающей термодинамическое равновесие в системе квантовых вихрей в сверхтекучих жидкостях и в конденсате Бозе – Эйнштейна в присутствии противотока нормальной и сверхтекучей компонент. Следует подчеркнуть, что эта задача сама по себе также важна и интересна, но что касается турбулентности, имеются основания прояснить многие аспекты структуры и динамики вихревого клубка. Ранее (см. [1]) нами было показано, что ансамбль вихревых нити под действием случайной ланжевеновской силы в сверхтекучем гелии в присутствии противотока с относительной скоростью $\mathbf{v}_{ns}$ приходит в состояние термодинамического равновесия с распределением Гиббса

$$P(\{\mathbf{s}(\xi)\},t) = N\exp(-\frac{H_c(\{\mathbf{s}\})}{k_B T}) \qquad (1)$$

Здесь $\mathbf{s}(\xi,t)$ - радиус-векторы элементов вихревой линии, N - нормировочный множитель. Гамильтониан $H_c\{\mathbf{s}\}$ в присутствии относительной скорости $\mathbf{v}_{ns}$ имеет вид

$$H_c(\{\mathbf{s}\}) = E(\{\mathbf{s}\}) - \mathbf{P}(\mathbf{v_n} - \mathbf{v_s}) \qquad (2)$$

Здесь энергия $E(\{\mathbf{s}\})$ и импульс Лэмба $\mathbf{P}(\{\mathbf{s}\})$ определены как (см., например, [2])

$$E(\{\mathbf{s}\}) = \frac{\rho_s \kappa^2}{8\pi}\int_\Gamma\int_{\Gamma'}\frac{\mathbf{s}'(\xi)\mathbf{s}'(\xi')}{|\mathbf{s}(\xi)-\mathbf{s}(\xi')|}d\xi d\xi' \qquad (3)$$

$$\mathbf{P}(\{\mathbf{s}\}) = \frac{\rho_s \kappa}{2}\int \mathbf{s}(\xi)\times\mathbf{s}'(\xi)d\xi \qquad (4)$$

Соотношения (1) – (4) должны быть использованы для вычисления статистической суммы, и, соответственно, для определения различных свойств вихревого клубка. Статистическая сумма выражается в виде континуального интеграла от конфигураций вихревых петель $\{\mathbf{s}(\xi)\}$

$$Z(T,\mathbf{V}_{ns}) = \int D\{\mathbf{s}_j(\xi)\}\sum\exp(-\frac{H\{\mathbf{s}\}}{k_B T}) \qquad (5)$$

С использованием полученной статистической суммы можно вычислить структурные факторы квантовой турбулентности, например среднюю поляризацию вихревых петель, входящих в состав вихревого клубка в противотоке гелия II, а также анизотропию и среднюю кривизну. Эти величины были ранее получены только в численной работе Шварца [3]. Представляет интерес сравнить результаты по равновесным свойствам вихревого клубка, которые могут быть получены на основании развитого здесь формализма, с данными по квантовой турбулентности.

Список литературы

1. Nemirovskii, S.K. Thermal Equilibrium of Vortex Lines in Counterflowing He II // Journal of Low Temperature Physics. 2016. V. 185. № 5-6. P. 365–370.
2. Nemirovskii S. K., Quantum turbulence: Theoretical and numerical problems // Phys. Rep. 2013. V. 524, P. 85–202.
3. Schwarz, K. W., Three-dimensional vortex dynamics in superfluid $He4$: Homogeneous superfluid turbulence // Phys. Rev. B. 1988. V. 38. № 4. P. 2398–2417.

Работа поддержана РНФ (грант № 19-19-00321)

УДК 533.15+533.723+544.743

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА НАНОЖИДКОСТЕЙ С УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ. ЭКСПЕРИМЕНТ И МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Рудяк В.Я.[1,2], Белин А.А.[1], Третьяков Д.С.[2]

[1] Новосибирский государственный архитектурно-сторительный университет (Сибстрин)
[2] Новосибирский государственный университет

e-mail: valery.rudyak@mail.ru

Наножидкости с углеродными нанотрубками (УНТ) – активно исследуемый в последние два десятилетия новый класс дисперсных флюидов. В первую очередь это вызвано исключительными электрическими, механическими и теплофизическими свойствами УНТ. Естественно было считать, что и наножидкости будут также иметь особые свойства. Более того, практически любое использование УНТ предполагает предварительное создание соответствующих наножидкостей. Существующее и возможное в будущем поле применения УНТ действительно чрезвычайно широкое (см., например, [1–3]). Изучение теплофизических свойств наножидкостей поэтому весьма актуально и этим активно занимается несколько десятков групп по всему миру. Сложность, однако, состоит в том, что фактически обычно изучаются свойства совершенно разных наножидкостей. Связано это с тем, что УНТ достаточно сложный объект, в зависимости от используемой технологии создания они могут быть одностенными, двухстенными или многостенными. Диаметр одностенных УНТ составляет 1–2 нм, тогда как длина может достигать сотен нанометров или даже десятков микрометров. У многостенных УНТ диаметр может составлять нескольких десятков нанометров. Помимо этого, для приготовления наножидкостей обычно используются различного типа поверхностно активные вещества (ПАВ) и ультразвуковая обработка.

В работе [4] экспериментально изучена реология наножидкостей на основе этиленгликоля с одностенными УНТ. Целью данной работы является продолжение этих исследований. Работа является комплексной. Здесь, с одной стороны, экспериментально изучается вязкость и реология наножидкостей с одностенными УНТ, их диффузия в нескольких различных жидкостях. А с другой, представлены данные молекулярно-динамического моделирования диффузии УНТ. В экспериментах изучались наножидкости на основе воды с одностенными УНТ. Массовая концентрация УНТ варьировалась от 0.05 до 1%, а ПАВа – от 0.05 до 2%. Температура изменялась в диапазоне от 10 до 50^{o}C.

Наножидкости приготавливались стандартным двухшаговым методом. Применялись два различных типа ПАВ: анионный – додецилбензолсульфат натрия и не ионный – поливинилпирролидон. Вязкость и реология жидкостей во всех случаях изучались с помощью ротационного вискозиметра Brookfield DV3RV. Тестирование, проведенное на измерении вязкости воды и этиленгликоля и ее зависимости от температуры, показало, что точность измерения коэффициента вязкости около 2%.

Для определения размера УНТ и изучения их диффузии использовался метод динамического рассеяния света. Применялся прибор Malvern Zetasizer ZSP, который может измерять частицы размером от 0.3 нм до 10.0 мкм. Было показано, что при всех концентрациях УНТ наножидкости оказываются неньютоновскими. Их реология хорошо описывается моделью степенной жидкости, причем индекс жидкости падает с ростом концентрации трубок, а параметр консистентности напротив растет. С ростом температуры вязкость жидкости падает. Однако в обличие от обычных наножидкостей, зависимость вязкости которых при низких концентрациях наночастиц определяется соответствующей зависимостью базовой жидкости, здесь дело обстоит сложнее. В частности, установлено, что с изменением температуры меняются и индекс жидкости, и параметр консистентности.

Для измерения диффузии УНТ их массовая концентрация изменялась от 0.00001 до 0,01%. Найдена зависимость коэффициента поступательной диффузии от концентрации УНТ. Затем с использованием нескольких модельных подходов определен гидродинамический радиус УНТ и их длина. Обсуждается влияние вращательной диффузии УНТП.

Моделирование диффузии УНТ осуществлялось методом молекулярной динамики. Использовались 1D и 2D модели УНТ. Нанотрубки моделировались набором атомов углерода, задавались различные законы взаимодействия этих атомов между собой. Взаимодействие атомов УНТ с молекулами базовой жидкости описывалось потенциалом Леннард-Джонса. В качестве несущей жидкости рассматривались вода и бензол.

Изучена как поступательная, так и вращательная диффузия УНТ. Для определения коэффициентов переноса использовались как формулы Грина–Кубо, так и вычисление среднего квадрата смещения УНТ и среднего квадрата угла ее поворота относительно центра масс. Полученные данные сопоставлены с известными моделями броуновского движения и экспериментальными данными.

Список литературы

1. Saeed K., Ibrahim K. Carbon nanotubes – properties and applications: a review // Carbon Letters. 2013. V. 14. No. 3. P. 131–144.
2. Hanif, Saxena G., Raj J. A critical review on applications of nanofluid as coolant // Int. J. Eng. Manag. Res. 2017. V. 7. No. 1. P. 304–311.
3. Espinosa C., Ortiz-Trujillo I.C., Carlos-Cornelio J.A., et al. Carbon nanotube dispersion for in-vitro applications // DYNA. 2017. V. 84(203). P. 24–30.
4. Rudyak V Ya and Tretiakov D S. Viscosity and rheology of the ethylene glycol based nanofluids with single-walled carbon nanotubes // J. Physics. Conference Series. 2019. V. 1382. P. 012294.

Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 20-19-00043)

УДК 536.25

ВИХРЕВЫЕ СТРУКТУРЫ И ЛОКАЛЬНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В СВОБОДНО-КОНВЕКТИВНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ, ВОЗМУЩЕННОМ ТРЕХМЕРНЫМИ ПРЕПЯТСТВИЯМИ

Смирнов Е.М.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

e-mail: smirnov_em@spbstu.ru

Задача о развитии свободно-конвективного течения у нагретой вертикальной поверхности привлекает внимание ученых и инженеров на протяжении долгого времени. Чаще всего рассматривается развитие пограничного слоя вдоль гладкой пластины. С другой стороны, в ряде практических случаев свободно-конвективный пограничный слой (СКПС) может быть существенно возмущен одиночным препятствием или совокупностью нескольких препятствий. Такими «макро-шероховатостями» могут быть элементы конструкции промышленных устройств или жилых зданий. Препятствия могут быть и преднамеренно введены в СКПС, например, в целях интенсификации теплообмена и управления ламинарно-турбулентным переходом (ЛТП).

В настоящем докладе представляются результаты, полученные в последние три года по двум направлениям расчетных и экспериментальных исследований свободно-конвективного пограничного слоя воздуха у нагретой вертикальной пластины. Первое из них включает задачи изучения «тонкой» структуры трехмерного течения и локального теплообмена в области сильного возмущения турбулентного СКПС трехмерным препятствием (одиночным или в виде периодического ряда). Вторая группа задач охватывает вопросы ламинарно-турбулентного перехода в (статистически) двумерном свободно-конвективном слое при инициализации переходных процессов посредством установки на пластине поперечного ряда выступов (трехмерных элементов макрошероховатости).

Численное моделирование трехмерных вихревых структур и локального теплообмена в турбулентном СКПС, возмущаемом одиночным препятствием, проводилось с применением подходов разного уровня: RANS, LES, DNS. В докладе, в частности, сопоставляются данные, полученные на основе разных подходов для погруженных в слой адиабатических препятствий (выступов) в виде кругового цилиндра разной высоты и кубического препятствия. В качественном отношении, все численные решения предсказывают схожую осредненную во времени картину обтекания препятствия. Она характеризуется образованием передней отрывной зоны с формирующимися там подковообразными вихрями, ближнего следа сложной топологии и протяженную область восстановления СКПС. Основные различия количественного характера заключаются в том, что, по сравнению с данными LES и DNS расчетов, RANS модели предсказывают несколько больший (примерно на 20%) уровень пиковых значений коэффициента теплоотдачи, обусловленных действием подковообразных вихрей, и существенно большую протяженность области восстановления СКПС. Согласующиеся между собой расчеты по методам LES и DNS показывают, что образующиеся при обтекании препятствия крупномасштабные вихревые структуры, как подковообразные, так и в ближнем следе, характеризуются сильной нестационарностью; это приводит, в частности, к более монотонным профилям температуры по сравнению с предсказаниями RANS моделей. Результаты измерений (методом термоанемометрии) профилей скорости и температуры в окрестности препятствий, проведенных Ю.С.Чумаковым на имеющейся в СПбПУ экспериментальной установке для сходственных по параметрам СКПС условий, находятся в хорошем согласии с данными LES и DNS расчетов.

Исследование вопросов ламинарно-турбулентного перехода в СКПС, инициируемого посредством установки на нагреваемой пластине поперечного ряда прямоугольных выступов, проводилось, в основном, методом DNS.

Одна из решавшихся задач была направлена на подбор таких геометрических параметров макрошероховатости и ее местонахождения (в области ламинарного течения), которые обеспечивали бы положение области ЛТП (по локальному числу Грасгофа, Gr_x), близкое к реализуемому в опытах с гладкой пластиной, где специфика ЛТП определяется «естественными», слабо контролируемыми внешними возмущениями. Это, позволило, в частности, обоснованно (и с демонстрируемым успехом) сопоставить расчетные статистические характеристики развитого турбулентного СКПС с широко известными результатами измерений (Tsuji & Nagano, 1988), включенными в ERCOFTAC Data Base.

Другая решавшаяся задача заключалась в выяснении возможности триггерного возбуждения ЛТП при относительно малых значениях Gr_x. В результате многовариантных расчетов было установлено, что при высоте выступов, близкой к полной толщине ламинарного слоя, турбулентные процессы могут возбуждаться, непосредственно за выступами, при значениях числа Gr_x, на порядок меньших, чем в случае естественного перехода в условиях известных экспериментов. Столь значительное сокращение участка ламинарного течения дает существенный положительный эффект в отношении интенсификации теплообмена окружающей среды с нагреваемой поверхностью. Недавние эксперименты, выполненные на имеющейся в СПбПУ экспериментальной установке, подтвердили эффективность использования прямоугольных выступов для триггерного возбуждения турбулентности в СКПС при относительно малых значениях Gr_x.

Исследование поддержано Российским научным фондом (грант № 18-19-00082)

УДК 551.511.6

ИСКУССТВО И ТУРБУЛЕНТНОСТЬ: СПЕКТРЫ НА КАРТИНАХ ВЕЛИКИХ МАСТЕРОВ, НАЧИНАЯ ОТ ЛЕОНАРДО ДА ВИНЧИ

Сон Э.Е.

Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Московская обл.

son.eduard@gmail.com

Турбулентность – одно их самых значительных и интригующих явлений не только в гидродинамике, но во всей современной физике. Несмотря на 125–летнюю историю турбулентности, начиная от революционных работ Осборна Рейнолдса[1] в 1894 г., можно обоснованно считать[3], что по большому счету, всего два результата были принципиальными а теории турбулентности – это, во-первых, метод Рейнольдса статистического осреднения уравнений Навье-Стокса и получение уравнений Рейнольдса и, во-вторых, теория Колмогорова о спектре однородной изотропной турбулентности[2], которая следует из теории размерности и до сих пор не получена как следствие точных решений уравнений Навье-Стокса или Рейнольдса. Спектры Колмогорова наблюдались в большом числе совершенно разных явлений в природе и лаборатории. Согласно современным представлениям, турбулентность является совокупностью вихрей различного масштаба от размеров объема, в котором развивается турбулентность до минимальных вихрей диссипативного масштаба.

Методы получения спектров турбулентности постоянно совершенствуются. Уже во времена эпохи Возрождения количество вихрей различных масштабов (спектры турбулентности) можно было получить считая по изображению число полных вихрей или восстанавливая их по фрагментам, разделив на диапазоны по размерам радиусов, соответствующих волновым числа $k=2\pi/r$. В современных методах обработки изображений (Image processing)[4] используются оператор Собеля - дискретный дифференциальный оператор для вычисления приближённого значения градиента яркости изображения, оператор Кэнни для обнаружения границ изображения, преобразование Хафа для определения прямых и кривых линий на полутоновых или цветных изображениях. Построение спектра основано на теореме Котельникова о дискретизации в цветовой системе HSV. Программа получения спектров из изображений написана на языке C^{++} (MVS) с расчетами на суперкомпьютерном кластере.

Начиная с 1990-х годов мы[4] развивали физические методы получения преобразований Фурье, основанные на том, что изображение оптической линзой может быть преобразовано в Фурье, для этой цели создана экспериментальная установка, позволяющая получать преобразования Фурье изображений на картинах, фотографиях, экспериментальных и расчетных результатов статических и динамических объектов.

В картинах художников с турбулентными пейзажами, написанными в близком соответствии с наблюдениями, должны наблюдаться колмогоровские или близкие к ним спектры. Эта гипотеза была проверена в данной работе. Были обработаны картины великих мастеров - Леонардо да Винчи, Рембрандта, Клода Моне, Сикейроса, Тёрнера, Хокусаи, Кармайкла, Курбе и Айвазовского. Особый интерес вызывают работы по изображению звездного неба Винсента Ван Гога, где представлена сверхзвуковая турбулентность.

Список литературы

1. Reynolds O. On the dynamical theory of turbulent incompressible viscous fluids and the determination of the criterion // Phil. Trans. R. Soc. London, 1894, 186, P. 123–161.
2. Колмогоров А. Н. Локальная структура турбулентности в несжимаемой вязкой жидкости при очень больших числах Рейнольдса. // ДАН СССР, 1941, 30, № 4, С. 299–303.
3. Сон Э. Е., Сон К. Э. Турбулентность течений с объемными силами, Янус-К, 2019, 850 с.
4. Сон Э. Е. Лекции по методам обработки изображений. Самсунг Аэроспейс, Сеул, 1993.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (ПНИЭР RFMEFI60719X0323)

УДК 536.24

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СТРУЙНЫХ И ОТРЫВНЫХ ПОТОКОВ

Терехов В.В., Терехов В.И.

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

e-mail: vt@itp.nsc.ru

Взаимодействие между струйными и отрывными потоками часто реализуется в различных энергетических установках, строительных конструкциях, в целом ряде технологических процессов. Наглядным примером могут служить импактное охлаждение поверхностей системами струй или тепловая защита вдувом газа через системы отверстий. Процессы интерференции отрывных потоков имеют важное значение при разработке методов интенсификации тепло и – массообмена, а также в строительной теплофизике при изучении сложной картины взаимного влияния в системе плохообтекаемых тел различных форм и масштабов. Можно отметить возрастающий в последнее время интерес к изучению этих проблем [1–4].

В настоящем докладе представлен обзор современного состояния экспериментальных и численных исследований структуры турбулентного течения и тепломассообмена при интерференции струйных и отрывных потоков различных масштабов и интенсивностей. Последовательно рассмотрены различные аспекты данной проблемы, сделаны попытки обобщений и поиск общих закономерностей различных типов взаимодействия струйных и отрывных потоков. Наиболее полно представлены результаты, полученные в Институте теплофизики СО РАН в последнее десятилетие.

В самом простом случае взаимодействия двух параллельных струй наибольшее внимание уделялось плоским струям [5], что объясняется более простой картиной течения и возможностью использования двумерных приближений при численном анализе. При этом круглые струи значительно чаще используются в инженерных приложениях, поэтому их изучение является актуальным [6]. При одинаковых размерах сопел и начальной скорости истечения параметрами задачи являются расстояние между струями и их число Рейнольдса. Наибольший интерес представляет определение расстояния, на котором происходит полное смешение двух струй, после чего они движутся как единое целое. Такие данные позволяют создавать оптимальные системы охлаждения, в том числе и при использовании закрученных струй [7].

Исследования интерференции отрывных потоков преследуют собой подробное изучение физики процессов взаимодействия турбулентных структур различных масштабов с целью подавления или интенсификации процессов переноса. Учитывая большое разнообразие возможных форм вихрегенераторов, а также соотношение масштабов отрывных потоков и других факторов, можно судить о масштабности предстоящих исследований. Имеющиеся данные в этой области свидетельствуют о больших потенциальных возможностях использования как двумерных [2], так и трехмерных преград (табов) [8,9] для пассивного управления теплообменом. Использование табов также эффективно для усиления смешения в затопленных и импактных струях, что показано в большом числе исследований.

Интенсивность взаимодействия отрывных потоков в системе зданий и сооружений принято характеризовать величиной коэффициентов динамической и тепловой интерференции [3,4]. Если для динамики течения (максимального или среднего коэффициента давления) влияние вихревой пелены от впереди стоящего здания может быть очень сильным, то коэффициент тепловой интерференции, как правило, консервативен к этим возмущениям. Это установлено для обтекания двух расположенных в следе призм. Для более сложных схем расположения моделей и при большом их числе нужны дальнейшие детальные исследования.

Список литературы

1. Терехов В.И., Богатко Т.В., Дьяченко А.Ю., Смульский Я.И., Ярыгина Н.И. Теплообмен в дозвуковых отрывных потоках // Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2016. 239 с.
2. Терехов В.И., Смульский Я.И. Экспериментальное исследование теплообмена при взаимодействии двух отрывных потоков различного масштаба. // ПМТФ. 2015. №. 5. С. 156–164.
3. Yu X.F., Xie Z.N., Zhu J.B., Gu M. Interference effects on wind pressure distribution between two high-rise buildings // Journal of Wind Eng. Ind. Aerodyn. 2015. V. 142. P. 188–197.
4. Коробков С.В., Гныря А.И., Терехов В.И. Динамическая и тепловая интерференция в системе из двух моделей зданий // Вестник ТГАСУ. 2019. Т. 21, № 5. С. 138–150.
5. Akiyama T., Yamamoto K., Squires K.D., Hishida K. Simulation and measurement of flow and heat transfer in two planar impinging jets // Int. J. Heat Fluid Flow. 2005. V. 26. P. 244–255.
6. Филиппов М.В., Чохар И.А., Терехов В.В., Терехов В.И. Интерференция в системе струй // XXV Всероссийский семинар по струйным, отрывным и нестационарным течениям 2018. С. 232–233.
7. Huang R.F., Duc L.M., Hsu C.M. Flow and mixing characteristics of swirling double-concentric jets influenced by a control disc at low central jet Reynolds numbers// Int. J.Heat and Fluid Flow, 2016. V. 62B. P. 233–246.
8. Park H., Jeon W.-P., Choi H., Yoo J.Y. Mixing enhancement behind a backward-facing step using tabs // Phys. Fluids, 2007. V. 19. No. 10. P. 105103-1-12.
9. Дьяченко А.Ю., Жданов В.Л., Смульский Я.И., Терехов В.И. Экспериментальное исследование теплообмена в отрывной области за обратным уступом при наличии табов // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26. № 4. Р. 549 – 560.

Исследования поддержаны РНФ в части отрывных течений (грант № 18-19-00161) и РФФИ в части взаимодействия струй (грант 18-09-00986)



СЕКЦИЯ 1
Теплообмен и гидродинамика в однофазных средах

УДК 621.9

ТЕПЛООБМЕН В ЗАМАНЖЕТНОЙ ПОЛОСТИ КРУПНОГАБАРИТНОГО РДТТ

Бендерский Б.Я., Чернова А.А.

Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова

e-mail: alicaaa@gmail.com

Компоновка крупногабаритного твердотопливного ракетного двигателя, как правило [1-5], включает отдельные полости, не занятые топливом. Наличие таких заманжетных полостей приводит к снижению напряжений деформируемого состояния в заряде двигателя с одной стороны и к организации зон возвратных течений [5-11] с другой. Расположение заманжетных полостей вблизи днищ сопряжено с необходимостью решения вопросы дополнительной тепловой защиты конструктивных элементов, для чего требуется информация об особенностях процессов теплообмена в заманжетной полости.

Рассматриваются вопросы численного моделирования сопряженной задачи теплообмена в предсопловом объеме (ПО), проточных трактах и заманжетной полости РДТТ. Течение газа описывается моделью вязкого турбулентного теплопроводного сжимаемого газа. Рабочее тело – продукты сгорания условного твердого топлива (ПС) с показателем адиабаты 1,2 и температурой горения 3000К. На поверхностях массоподвода задаются температура и расход ПС. Между границей твердого тела и газа задавалось условие сопряжения [11]. Система уравнений сохранения, осредненная по Фавру и Рейнольдсу [12], замыкается с использованием двухзонной модели турбулентности Ментера SST [13, 14]. Дискретизация основных уравнений осуществляется методом конечных объемов с учетом поправки Rhie-Chow. Для дискретизации невязких потоков применяется противопоточная схема 2-го порядка точности, а для вязких потоков – центрированная схема 2-го порядка точности. Система разностных уравнений решается алгебраическим многосеточным методом, для ускорения сходимости которого используется метод сопряженных градиентов. Дискретизация расчетной области производилась с использованием шестигранников, общее количество которых составляло 3,43 млн элементов, включая призматические ячейки для разрешения пристеночных течений.

Необходимо отметить, что в представляемой работе рассматриваются теплофизические процессы, протекающие на квазистационарном режиме работы двигателя, характеризующиеся максимальной интенсивностью процессов теплообмена. Задача решается методом установления, условие достижение сходимости – $RMS<10^{-6}$.

В результате проведенных расчетов получены распределения полей физических величин в заманжетной полости ПО РДТТ. Выявлена и описана топология потока в заманжетной полости, показана ее перестройка при линейном смещении утопленного соплового блока. Выявлены топологические особенности потока вблизи днища в области заманжетной полости, показано увеличение интенсивности теплообмена вблизи выявленных топологических особенностей. Изучено их изменение при линейном смещении утопленного соплового блока.

Получены закономерности изменения числа Нуссельта в области заманжетной полости, а также распределение коэффициента теплоотдачи на поверхности утопленного сопла. Сравнение численных данных с результатами эксперимента [5] дает удовлетворительное совпадение.

Список литературы

1. Абугов Д.И., Бобылев В.М. Теория и расчет ракетных двигателей твердого топлива. Учебник для машиностроительных вузов. М.: Машиностроение. 1987. 272 с.
2. Фахрутдинов И.Х., Котельников А.В. Конструкция и проектирование ракетных двигателей твердого топлива. М.: Машиностроение. 1987.
3. Коваленко Н.Д., Стрельников Г.А., Золотько А.Е. Газодинамические аспекты и разработки сопел двигателей ступеней ракет с высокой плотностью компоновки // Техническая механика. 2011. № 2. С. 36–53.
4. Шишков А.А., Панин С.Д., Румянцев Б.В. Рабочие процессы в ракетных двигателях твердого топлива: Справочник. М.: Машиностроение. 1988. 240 с.
5. Савельев С.К., Емельянов В.Н., Бендерский Б.Я. Экспериментальные методы исследования газодинамики РДТТ. Санкт-Петербург. 2007. 267 с.
6. Зайковский В.Н., Меламед Б.М. Экспериментальное исследование теплообмена в дозвуковом проточном тракте поворотных сопел РДТТ // III Междун. школа-семинар «Нестационарное горение и внутренняя баллистика». СПб. 2000. С. 112–114.
7. Volkov K.N., Denisikhin S.V., Emel'yanov V.N. Gas Dynamics of a Recessed Nozzle in Its Displacement in the Radial Direction // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2017. Vol. 90. No. 4. P. 932–940.
8. Бендерский Б.Я., Саушин П.Н., Чернова А.А. Пространственная газовая динамика в узлах энергетических установок летательных аппаратов // Вестник казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2011. №1. С. 8–11.
9. Volkov K.N., Emel'yanov V.N., Denisikhin S.V. Formation of Vortex Structures in the Prenozzle Space of an Engine with a Vectorable Thrust Nozzle // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2016. Vol. 89, no. 3. Pp. 660 – 670.
10. Бендерский Б.Я, Чернова А.А. Особенности теплообмена в предсопловом объеме РДТТ с зарядами сложной формы // Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25, № 2. С. 277-284.
11. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. М.: Физматлит. 2008. С. 368.
12. Sharfarets, B.P., Dmitriev, S.P. Modeling of turbulent fluid motion based on the boussinesq hypothesis. Overview. Journal Nauchnoe Priborostroenie. 2018. № 28 (3). С. 101–108.
13. Menter F.R., Kuntz M., Langtry R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model // Proc. 4th. Int. Symp. on Turbulence, Heat and Mass Transfer. Begell House. 2003. P. 625–632.
14. Isaev S., Popov I., Gritckevich M., Leontiev A. Abnormal enhancement of separated turbulent air flow and heat transfer in inclined single-row oval-trench dimples at the narrow channel wall // Acta Astronautica. 2019. V. 163. Part A.

Исследование выполнено при финансовой поддержке ИжГТУ имени М.Т. Калашникова в рамках выполнения научного проекта №ЧАА/20-30-07

УДК 536.24

ВЛИЯНИЕ МИНИТУРБУЛИЗАТОРА НА ТЕЧЕНИЕ И ТЕПЛООБМЕН В ТРУБЕ С ВНЕЗАПНЫМ РАСШИРЕНИЕМ

Богатко Т.В., Терехов В.И.

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

e-mail: bogatko1@mail.ru

В работе представлены результаты численного исследования пассивного управления отрывным течением, как способа повышения теплоотдачи с использованием дополнительных турбулизирующих элементов, существенно меньших геометрических масштабов, чем основное препятствие, вызывающее отрыв потока.

Расчётная область представляет собой цилиндрический канал с внезапным расширением r/R = 0,6. Для дополнительного возмущения пограничного слоя, в трубу малого калибра устанавливалась плоская кольцевая диафрагма высотой h_g (рис.1).

Управление отрывным течением осуществляется за счет введения в отрывную зону дополнительного вихревого слоя, приводящего к кардинальным изменениям структуры сдвигового слоя и всей рециркуляционной зоны, смещению x_R и соответственно к перераспределению коэффициентов тепломассоотдачи. В расчетах варьировалась высота турбулизатора h_g и его расположение до точки отрыва потока S_g.

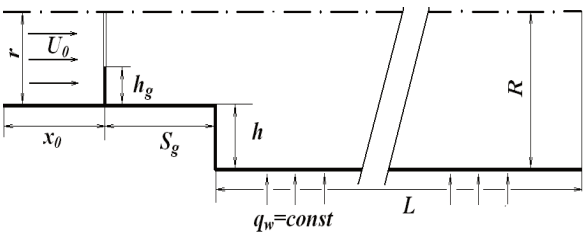


Рис. 1. Геометрия канала.

Сравнение относительных длин координаты точки максимума теплоотдачи x_{max}, значения Nu_{max}, а также протяженности рециркуляционной зоны x_R для всех рассмотренных случаев представлено на рис. 2 при фиксированных значениях h/R = 0,4 и h_g /R = 0,1.

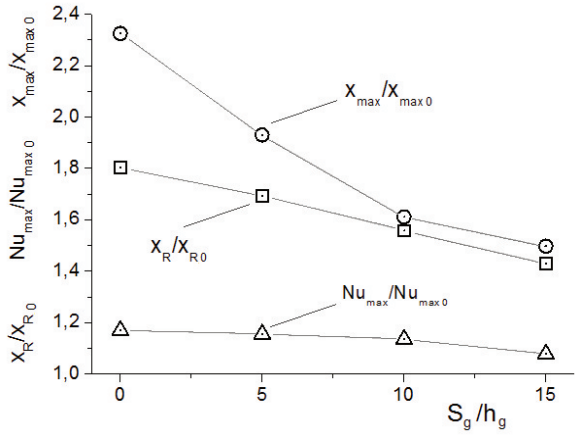


Рис. 2. Координаты точки присоединения, Nu_{max} и его расположения при вариации положения турбулизатора.

Можно отметить, что все эти величины снижаются по мере удаления диафрагмы от уступа (рис. 2). Наибольшее влияние местоположения диафрагмы наблюдается для координаты максимума теплоотдачи X_m/X_{mo}. Слабые изменения претерпевает величина максимального коэффициента теплоотдачи.

При этом распределение локальных значений числа Нуссельта, свидетельствует о принципиально ином характере распределения локальных коэффициентов теплоотдачи в зависимости от местоположения турбулизатора. При наличии диафрагмы, начиная с места присоединения сдвигового потока, имеется достаточно протяженное «плато» с практически постоянным коэффициентом теплоотдачи. Очевидно, что интегральный теплообмен, рассчитанный по участку трубы длиной 0 < X/h< 25÷30, где наблюдается интенсифицированная теплоотдача, будет значительно превышать его величину без вихреобразующей минидиафрагмы. В то же время значения Nu тем больше, чем ближе к краю уступа установлена преграда. Таким образом, можно предположить, что теплообмен увеличивается в связи с дополнительным воздействием турбулизированного следа от диафрагмы на структуру отрывного потока за уступом или внезапным расширением трубы. Происходит увеличение масштабов рециркуляционной зоны и скорости вращения потока в ней.

Вариация высоты турбулизатора в расчетах производилась в пределах $h_g/R = 0 \div 0{,}2$, в то время как его положение было зафиксировано (S_g/R=1). Увеличение высоты дополнительного турбулизатора приводит к росту отрывного пузыря, повышению уровня теплообмена на стенке за уступом, а также к смещению положения максимального теплообмена вниз по потоку.

Таким образом, при изучении процесса взаимодействия отрывных потоков различных масштабов в трубе с внезапным расширением показало кардинальное изменение структуры рециркуляционной зоны. Установлено, что дополнительный турбулизатор приводит к смещению точки присоединения потока и, соответственно, к перераспределению коэффициентов тепломассоотдачи. Приближение преграды к точке отрыва приводит к увеличению размеров рециркуляционной области и повышению интенсивности теплообмена. Увеличение высоты турбулизатора аналогичным образом сказывается на характеристиках отрывного течения. Данные численного эксперимента свидетельствуют о значительных потенциальных возможностях подобного метода управления тепломассообменом.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН (АААА-17-117030310010-9) и проекта РФФИ №20-58-00038

УДК 532.526

О ПРОГНОЗЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПЕРЕХОДА К ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ТРЕХМЕРНЫХ ПОГРАНИЧНЫХ СЛОЯХ ТЕЛ В ТРАНСЗВУКОВОМ ПОТОКЕ

Бойко А.В.[1], Демьянко К.В.[1,2], Кириловский С.В.[1], Нечепуренко Ю.М.[1,2], Поплавская Т.В.[1]

[1] Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск
[2] Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука, Москва

e-mail: popla@itam.nsc.ru

Экономичность летательных аппаратов (ЛА) существенно зависит от соотношения длин ламинарной и турбулентной частей пограничного слоя и протяженности ламинарно-турбулентного перехода (ЛТП). Поэтому одной из ключевых задач в проектировании перспективных ЛА стала ламинаризация обтекания потоком различных элементов ЛА с целью уменьшения сопротивления, вызванного напряжением трения в турбулентном пограничном слое. Процесс перехода также оказывает существенное влияние на отрыв потока и теплоперенос в пограничном слое (ПС), что во многом определяет требования к различным элементам конструкции, а также размещению приборов и другого оборудования. Поэтому определяющим фактором адекватного моделирования обтекания ЛА является правильный расчет положения и протяженности ЛТП. Для решения этой задачи инженерам и проектировщикам необходимо наличие соответствующих подходов и программ для прогноза положения ЛТП на различных элементах конструкции с требуемой точностью.

Одним из современных подходов для моделирования перехода является eN-метод, в основе которого лежит физически обоснованная линейная теория гидродинамической устойчивости, которая справедлива для трёхмерных сжимаемых потоков. В настоящее время eN-метод определения ЛТП не представлен в газодинамических пакетах общего назначения, но используется в качестве отдельно подключаемого модуля [1-3].

Авторами настоящей работы создан модуль ЛТП, работающий в интеграции с газодинамическим пакетом ANSYS Fluent (Рис.1). Модуль ЛТП разработан на базе автономного программного комплекса LOTRAN 3.0 [4], реализованного в среде MATLAB для анализа аэродинамической устойчивости и расчета ЛТП в трехмерных пограничных слоях на основе eN-метода.



Рис.1. Схема интеграции блока ЛТП с газодинамическим пакетом ANSYS Fluent.

Работа интегрированного в пакет модуля ЛТП продемонстрирована на примере задач трансзвукового обтекания тел разной геометрии: вытянутый сфероид и мотогондола (Рис.2). Эти модели интересны тем, что на их криволинейных поверхностях реализуются режимы с сильным поперечным течением и отрывными зонами, поэтому ЛТП может возникать как вследствие неустойчивости волн Толлмина – Шлихтинга (ТШ), так и неустойчивости поперечного течения (ПТ).

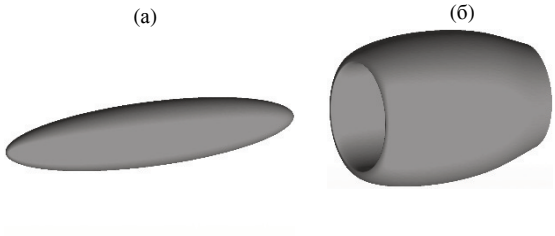


Рис.2. Модели, используемые в численном моделировании: (а) – вытянутый сфероид длиной 2.4 м и диаметром 0.4 м с отношением полуосей 6:1; (б) – мотогондола с протоком, имеющая продольный размер 0.6 м.

В работе обсуждаются принципы моделирования основного течения, выполнение которых необходимо для получения с приемлемой для практики точностью профилей, которые используются далее в модуле ЛТП для определения положений перехода, а также для экономии вычислительных ресурсов и снижения временных затрат.

В блоке ЛТП полученные данные основного течения преобразуются во внутреннее представление с помощью специального модуля, разработанного для ANSYS Fluent. Все остальные модули блока универсальны. Расчет положений перехода в трехмерном ПС сводится к расчету положений перехода в двумерных разрезах вдоль построенных модулем ЛТП линий тока. В каждом двумерном разрезе рассматриваются уравнения распространения трехмерных возмущений, основанные на полных уравнениях тепломассопереноса вязкой сжимаемой среды.

В работе получены новые данные по положению ЛТП в трехмерных ПС тел сложной конфигурации, обтекаемых трансзвуковым потоком, и исследуется вопрос о доминирующем механизме ЛТП на криволинейных поверхностях.

Список литературы

1. Krimmelbein N., Radespiel R. Transition prediction for three-dimensional flows using parallel computation // Computers & Fluids. 2009. V. 38. P. 121–136.
2. Krumbein A. Automatic Transition Prediction and Application to Three-Dimensional High-Lift Configurations //Journal of Aircraft. 2007. V. 44. № 3. P. 918–926.
3. Poplavskaya T.V., Boiko A.V., Demyanko K.V., Kirilovskiy S.V., Nechepurenko Y.M. Numerical simulation of the transition to turbulence in subsonic and transonic flows // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1359. № 012068.
4. Boiko A.V., Demyanko K.V., Nechepurenko Y.M // Rus. J. Numer. Anal. Math.Modelling. 2017. V. 32. № 1. P. 1–12.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-19-00460)

УДК 536.25

НЕСТАЦИОНАРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКУТРЫ ПОТОКА В ВИХРЕВОЙ ТРУБЕ РАНКА-ХИЛША

Веретенников С.В., Евдокимов О.А., Сергеев М.Н.

Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева

e-mail: serveret@yandex.ru

Совершенствование технических устройств использующих закрутку потока для интенсификации процессов тепломассообмена требует развития фундаментальных знаний о природе протекающих процессов. Вихревые трубы Ранка-Хилша получили широкое применение в технике: в холодильной промышленности, системах кондиционирования, ожижения и антиобледенения и т.д [1,2]. Тем не менее, проектирование новых технических устройств, содержащих в своем составе вихревые устройства, сопряжено со сложностью поиска наиболее эффективных режимов работы и оптимальных массогабаритных характеристик, что неизменно приводит разработчиков к необходимости длительной доводки. Причинами отмеченного является то, что накопленный многолетний опыт исследований вихревых труб базируется на результатах исследования интегральных характеристик при различном сочетании режимных и геометрических параметров, сведенных в критериальные зависимости [1,2]. Такой подход, несомненно, дает корректную информацию о характеристиках трубы и ее применимости в тех или иных условиях эксплуатации. С другой стороны, до сих пор остается неизученной взаимосвязь интегральных характеристик вихревой трубы с внутренней структурой течения, понимание которой даст возможность повышения термогазодинамической эффективности и обеспечения геометрической оптимизации трубы.

Несмотря на интенсивное изучение явления энергоразделения в закрученном потоке вихревой трубы, исследователи пока не пришли к единому мнению о его механизме [1,3]. Учитывая, современные достижения в области изучения структуры закрученных потоков, можно сделать предположение, что немаловажную роль в эффекте энергоразделения играют трехмерные спиральные вихревые структуры, формирующиеся в вихревой трубе [1,3]. Возникновение таких структур в вихревых трубах часто связывают с неустойчивостью типа контактного разрыва на радиусе разделения периферийного и приосевого вихрей. При этом течение в вихревой трубе оказывается, как правило, нестационарным. Указанные обстоятельства определяют актуальность проведения расчетных исследований газодинамических и теплообменных процессов в вихревых трубах с учетом их нестационарности.

В качестве объекта исследования выбрана классическая противоточная вихревая труба с камерой энергоразделения диаметром 10 мм. Входное закручивающее устройство тангенциального типа выполнено в виде двух прямоугольных сопел, суммарная относительная площадь которых составляла 0,1.

Течение в модели вихревой трубы описывается системой нестационарных дифференциальных уравнений выражающих законы сохранения массы, импульса и энергии. При этом связь параметров состояния рабочего тела (воздуха) определяется уравнением состояния идеального газа. Зависимость теплопроводности и динамической вязкости от температуры учитывалась формулой Сазерленда. Расчеты выполнены с использованием двух моделей турбулентности: широко используемая для моделирования закрученных потоков модель Ментера (SST) и модель переноса Рейнольдсовых напряжений RSM BSL (Reynolds Stress Model BaseLine), учитывающая анизотропию турбулентности.

Компьютерная визуализация структуры течения в вихревых трубах позволяет представить процессы, протекающие в камере энергоразделения, обеспечивающие перенос энергии в форме тепла от приосевого вихря к периферийному. Визуализация картины течения в продольном сечении показывает неравномерность масштаба вихревой структуры в различных областях камеры. Крупномасштабная вихревая структура зарождается в сечении, приближенном к сопловому вводу, и разрушается непосредственно в области размещения дросселя, при этом течение характеризуется неустойчивостью. Вблизи закручивающего устройства течение носит устойчивый характер, а на удалении от соплового ввода структуру потока определяет прецессирующий спиральный вихрь.

В периферийной части камеры энергоразделения формируется спиральный вихрь. Формирование спиралевидной структуры течения в вихревой трубе носит нестационарный характер. С увеличением перепада давления на вихревой трубе возрастает окружная компонента скорости, что приводит к возрастанию интенсивности вращательного движения и уменьшению шага спирального вихря. Периферийный вихрь распространяется вдоль камеры энергоразделения создавая в приосевой области зону пониженного давления. Следует отметить наличие собственного вращения спирального вихря. Несмотря на то, что интенсивность этого вращения мала по сравнению с основным вращательным движением, его вкладом в распределение термогазодинамических параметров в камере энергоразделения полностью пренебрегать нельзя.

Список литературы

1. Пиралишвили Ш.А. Вихревой эффект: Физическое явление, эксперимент, теоретическое моделирование. М.: ООО «Научтехиздат». 2013. 343 с.
2. Меркулов А. П. Вихревой эффект и его применение в технике. М.: «Машиностроение». 1969. 183 с.
3. Xiangji Guo, Bo Zhang, Bo Liu, Xiang Xu. A critical review on the flow structure studies of Ranque–Hilsch vortex tubes // Int. J. of Refrigeration. 2019. V. 104. P. 51–64.

Работа поддержана РФФИ (грант № 20-08-01199)

УДК 532.517

УСТОЙЧИВОСТЬ И НЕЛИНЕЙНЫЕ ВТОРИЧНЫЕ РЕЖИМЫ ДВОЯКОПЕРИОДИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ С ПРОКАЧКОЙ

Вертгейм И.И.[1], Закс М.А.[2], Сагитов Р.В.[3], Шарифулин А.Н.[4]

[1] Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
[2] Университет им. Гумбольдтов, Берлин
[3] Пермский государственный национальный исследовательский университет
[4] Пермский национальный исследовательский политехнический университет

e-mail: wertg@icmm.ru

Исследование пространственно-периодических течений несжимаемой жидкости, хотя и является идеализацией анализа реальных многовихревых течений, привлекает внимание как теоретиков, так и экспериментаторов. Каноническим примером является течение под действием силы, гармонически изменяющейся вдоль одной пространственной координаты, предложенное впервые А.Н. Колмогоровым в 1959 г. в качестве модельного объекта для лучшего понимания каскадного переноса энергии в турбулентном потоке и ставшего известным как течение Колмогорова [1]. На основе его анализа в ряде последующих теоретических работ были установлен длинноволновый характер неустойчивости, найдены границы монотонной устойчивости, и исследованы вторичные пространственно-периодические течения вблизи порога [2, 3]. Эти течения были в определённой степени реализованы и в экспериментах на основе электромагнитных сил, возникающих в слабопроводящей жидкости (электролите) из-за периодически расположенных в пространстве электродов и/или постоянных магнитов, с возможностью управления параметрами течения путем изменения силы тока и напряжённости магнитного поля [4]. В этих экспериментах были подтверждены неустойчивость основного течения при увеличении амплитуды воздействия и переход к вторичным режимам с периодичностью по двум координатам, а затем к квазипериодическим и более сложным режимам вплоть до турбулентности. Теоретически были рассмотрены несколько вариантов обобщений течения Колмогорова на случай двумерной периодичности под действием силы, периодической по двум координатам, а также при наличии прокачки в двух направлениях. При определенном выборе вынуждающей силы были получены несколько семейств точных решений: двухвихревых [5] и одновихревых со структурой типа «кошачьи глаза» [6]. Эти решения демонстрируют необычные динамические и спектральные свойства лагранжевой динамики жидких частиц в эффективном двумерном фазовом пространстве, промежуточные между ламинарными и турбулентными закономерностями: появление фрактального спектра скорости и аномальных транспортных свойств частиц-трассеров, меняющихся от субдиффузионных до супербаллистических. В данном исследовании рассмотрен вопрос о сохранении и возможных изменениях обнаруженных особенностей лагранжевой динамики переносимых частиц при потере устойчивости стационарного течения. Для упомянутых выше вынужденных плоских двоякопериодических течений [5,6] при изменении параметров: интенсивностей воздействия и прокачки и размеров ячейки периодичности проведён анализ возможных стационарных состояний, их устойчивости и развивающихся в результате неустойчивости вторичных колебательных и стационарных режимов. Анализ проведён на основе нескольких численных методов, включая конечно-разностные и псевдоспектральные, а также расчёты в рамках иерархии конечномерных моделей на основе тригонометрических полиномов.

Установлено, в частности, что семейство пространственно-периодических течений [5] в достаточно широком интервале параметров демонстрирует устойчивость даже при достаточно больших значениях амплитуды вынуждающей силы, при формировании интенсивного течения с искривленными линиями тока и сингулярными точками на границах вихря. Неустойчивость проявляется лишь для параметров, соответствующих вытянутым прямоугольным ячейкам периодичности, в стороны которых укладывается несколько периодов силы. Обнаружено, что рост возмущений стационарного течения в области неустойчивости как правило является колебательным. Это может существенно повлиять на поведение переменных в лагранжевом представлении, поскольку в связи с возникновением зависимости характеристик течения от времени эффективное фазовое пространство становится трехмерным, с возможностью появления хаотических траекторий.

Список литературы

1. Обухов А.М. Течение Колмогорова и его лабораторное моделирование // Успехи математических наук. 1983. Т. 38. №4(232). С. 101–111.
2. Мешалкин Л. Д., Синай Я. Г. Исследование устойчивости стационарного решения одной системы уравнений плоского движения вязкой жидкости // Прикладная математика и механика. 1961. Т. 25. № 6. С. 1700–1705.
3. Непомнящий А.А. Об устойчивости вторичных течений вязкой жидкости в неограниченном пространстве //Прикладная математика и механика. 1976. Т. 40. С. 836–841.
4. Гледзер Е.Б., Должанский Ф.В., Обухов А.М. Системы гидродинамического типа и их применение.М.: Наука. 1981. 368 с.
5. Zaks M., Pikovsky A., Kurths J. Steady viscous flow with fractal power spectrum // Phys. Rev. Lett. 1996. V. 77. P. 4338–4341.
6. Pöschke P., Sokolov I., Zaks M., Nepomnyashchy A. Transport on intermediate time scales in flows with cat's eye patterns. Phys. Rev. E. 2017. V. 96(6). P. 062128.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 20-51-12010 ННИО_а) и ННИО (DFG: Projekt ZA 658/3-1)

УДК 536.2+532.555

ТЕПЛООТДАЧА И КИНЕМАТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА В ДИФФУЗОРЕ

Давлетшин И.А.[1,2], Михеев Н.И.[1], Шакиров Р.Р.[1]

[1] Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ Казанский научный центр РАН
[2] Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ

e-mail: davlet60@mail.ru

Исследования гидродинамических и тепловых процессов в градиентных течениях являются актуальными задачами современной теплофизики. В частности, в работе [1] численным расчетом выявле- на возможность интенсификации теплообмена в диффузорных каналах по сравнению с каналами по- стоянного сечения. В качестве механизма этого явле- ния предлагается рассматривать турбулизацию пото- ка в расширяющемся канале. Вместе с тем современ- ные методы исследований позволяют получать новые данные о кинематической структуре таких потоков [2, 3].

В данной работе были проведены экспериментальные исследования теплоотдачи и кинематической структуры потока в диффузоре при различных степенях турбулизации потока рабочей среды (воздуха). Рабочий участок установки представлял собой плоский канал из прозрачного материала (поликарбоната) длиной 1,2 м (рис. 1). Диффузорный участок *3* длиной L=450 мм с углом раскрытия $\varphi=5^0$ располагался в центре канала. Ширина канала по всей длине составляла 150мм, высоты входного участка – H_0=63мм, выходного – H_1=100 мм. Во входном сечении канала на стыке с плавным входом устанавливались различные устройства для турбулизации потока *5*.

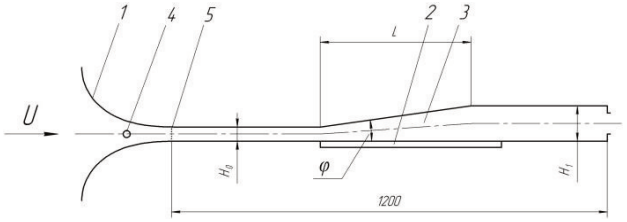


Рис. 1. Рабочий участок: 1 – входное устройство; 2 – теплообменная стенка; 3 – диффузорный участок; 4 – термометр; 5 – турбулизатор.

В работе показано, что турбулизация потока приводит к интенсификации теплоотдачи в основном за счет более раннего ламинарно-турбулентного перехода на начальном участке диффузора (рис. 2). Распределения коэффициента теплоотдачи α показали хорошие согласования с соотношениями для теплоотдачи на пластине:

$$St=0.332Re^{-0.5}Pr^{-0.67} \quad (1)$$

$$St=0.0306Re^{-0.2}Pr^{-0.6} \quad (2)$$

для ламинарного и турбулентного режимов течения. При этом согласования были получены при числах Рейнольдса $Re=U_0x/\nu$ и Стантона $St=\alpha/(c\rho U_0)$, опре- деленных по скорости потока на входе в диффузор- ный участок, где координата x отсчитывалась от начала обогреваемого участка (входного сечения в диффузор).

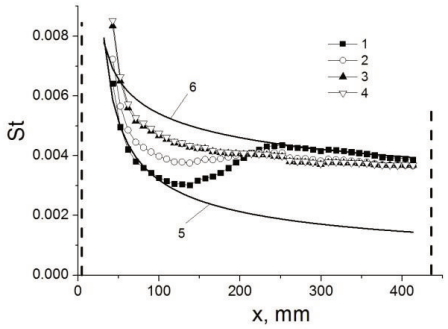


Рис. 2. Коэффициент теплоотдачи при $Re_0=U_0H_0/\nu$=12600:1 – гладкий канал; 2 – абразивная шероховатость; 3 – абразивная шероховатость + сетка; 4 – абразивная шероховатость + сетка + флажки; 5 – по со- отношению (1); 6 – по соотношению (2).

Получены профили скоростей и параметров турбулентности в характерных сечениях канала (рис. 3). Выявлено наличие корреляции между пульсациями поперечной скорости V' потока и коэффициентом теплоотдачи.

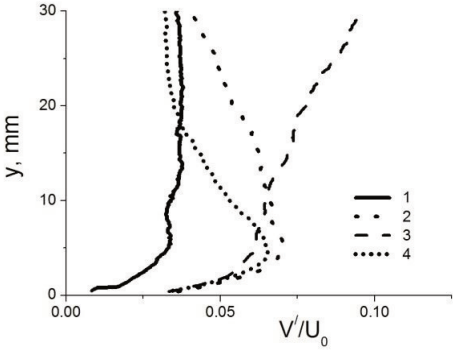


Рис. 3. Профили пульсаций поперечной скорости потока в сечении x=200мм (обозначения согласно рис. 2).

Список литературы

1. Леонтьев А.И., Лущик В.Г., Решмин А.И. Теплообмен в конических расширяющихся каналах // ТВТ. 2016. Т. 54. № 2. С. 287–293.
2. Hain R., Scharnowski S., Reuther N., Kähler C. J., Schröder A., Geisler R., ... & Cuvier C. Coherent large scale structures in adverse pressure gradient turbulent boundary layers // 18th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics Lisbon. Portugal. 2016. P. 04–07.
3. Soria J. et al. Spatially and temporally resoved 2C-2D PIV in the inner layer of a high Reynolds number adverse pressure gradient turbulent boundary layer // International Symposium on the Application of Laser and Imaging Techniques to Fluid Mechanics 2016. Springer-Verlag London Ltd. 2016.

Исследования теплообмена поддержаны РФФИ (грант № 18-08-00889) структуры потока – РНФ (грант № 19-19-00355)

УДК 536.2: 532.5: 519.6

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛООБМЕНА И КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ШАХМАТНОГО ПУЧКА СДВОЕННЫХ ТРУБ КРУГЛОЙ И КАПЛЕВИДНОЙ ФОРМЫ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ПОТОКЕ

Дееб Равад (Сирия), Сиденков Д.В.

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

e-mail: e.rawad.deeb@yandex.com

Для утилизации теплоты уходящих газов ГТУ возможно применение энергоустановок, работающих по «органическому» циклу Ренкина (ОЦР), в которых в качестве разделительного теплообменника могут применяться трубные пучки, наружная поверхность трубок омывается горячей (газовой) средой, а внутри труб протекает теплоноситель ОЦР.

Результаты исследований [1, 2] показывают, что обтекание пучка цилиндрических труб приводит к более раннему отрыву потока жидкости от поверхности трубы, что уменьшает теплоотдачу и увеличивает перепад давления в пучке труб.

В [3, 4] численно и экспериментально исследованы гидродинамики и характеристики теплообмена при поперечном обтекании трехрядного пучка каплевидных труб. Авторы подчеркивают, что при нулевом угле атаки коэффициент падения давления имеет самые низкие значения для всех значений числа Re, а значения среднего Nu выше примерно на 76% по сравнению с пучками из эллиптических труб того же эквивалентного диаметра.

В данной работе проводится численное исследование гидродинамики и теплообмена пучка труб каплевидной и круглой формы при нулевом угле атаки набегающего газового потока (рис.1). Разработана математическая и численная модель в пакете ANSYS для расчета теплообмена и гидродинамики пучка каплевидных труб с учетом напряжённо-деформированного состояния.

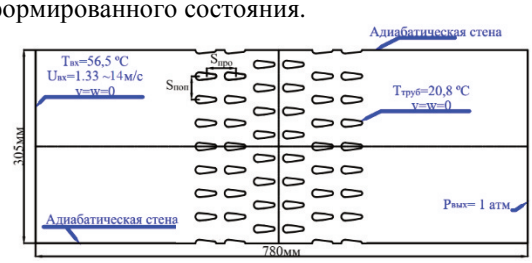


Рис.1. Двумерный канал с пучком каплевидных труб с граничными условиями.

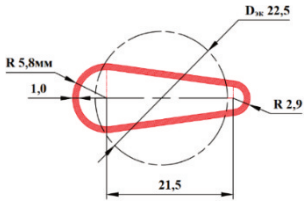


Рис.2. Поперечное сечение каплевидной трубы без нагрузки.

Каплевидные трубы имеют следующие размеры: радиус широкой части 5,8 мм, радиус малой части 2,9 мм, эквивалентный диаметр $D_{эк}$= 22,5 мм, Поперечное и продольное шаги в диапазоне $S_{поп}$ = 37 мм и $S_{про}$ = 37 ~ 46,25 мм соответственно. Геометрические характеристики поперечного сечения каплевидной трубы представлены на рис. 2.

Теплогидравлические характеристики каплевидных труб можно записать следующим образом [5]:

$$\eta = \frac{\overline{Nu}_{av,drop-shaped} / \overline{Nu}_{av,circ}}{f_{drop-shaped} / f_{circ}}$$

где $\overline{Nu} = \frac{\bar{\alpha} \cdot D_{eq}}{\lambda}$ – среднее число Нуссельта пучка; $\bar{\alpha}$ – средний по поверхности пучка коэффициент теплоотдачи Вт/(м^{2}К); $f = \frac{\Delta P}{0.5 \rho U_{av}^2 N_L}$ – коэффициент трения; ΔP – перепад давления в пучке, Па; U_{av} – средняя скорость потока в узком сечении пучка, м/с; N_L – количество поперечных рядов.

Рис. 3 демонстрирует сравнение теплогидравлических характеристик круглых и каплевидных труб. Коэффициент трения уменьшается с увеличением скорости воздуха.

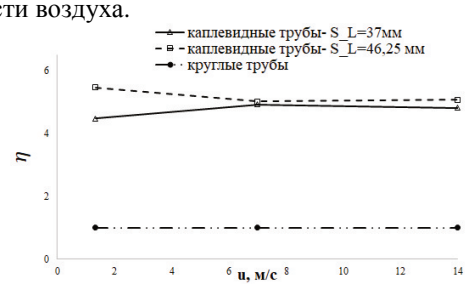


Рис.3. Теплогидравлические характеристики пучка круглых и каплевидных труб.

Было найдено, что коэффициент трения пучка каплевидных труб примерно на 13,4–28,3% ниже, чем у пучка круглых труб, и в результате теплогидравлические характеристики каплевидных труб примерно в 3,5–4,5 раза выше, чем у круглых. Эффективность каплевидных труб с продольным шагом 46,25 мм выше по сравнению с шагом 37 мм. Следовательно, настоящий анализ показывает, что при рассмотрении всех параметров пучок каплевидных труб лучше, чем круглых труб.

Список литературы

1. Buyruk E. Numerical study of heat transfer characteristics on tandem cylinders, inline and staggered tube banks in cross-flow of air // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2002. V. 29. P. 355–366. doi:10.1016/S0735-1933 (02) 00325-1.
2. Achenbach E. Total and local heat transfer from a smooth circular cylinder in cross-flow at high Reynolds number // Int J Heat Mass Tran. 1975. V. 18. P. 1387–1396.
3. Sayed E.S.A. et al. Heat transfer characteristics of staggered wing-shaped tubes bundle at different angles of attack // Heat and Mass Transfer. 2014. V. 50. № 8. P. 1091–1102.
4. Sayed E.S.A. et al. Effect of attack and cone angels on air flow characteristics for staggered wing shaped tubes bundle // Heat and Mass Transfer. 2014. V. 51. No. 7, P. 1001–1016.
5. Webb R.L. Performance evaluation criteria for use of enhanced heat transfer surfaces in heat exchanger design // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1981. V. 24. P. 715–726. doi:10.1016/0017-9310(81)90015-6.

УДК 533.6.011

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ ЦИКЛИЧЕСКОГО ДВИЖИТЕЛЯ

Дектерев А.А.

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

e-mail: dekterev@mail.ru

В последние годы заметен рост интереса к циклическим движителям и летательным аппаратам вертикального взлета-посадки на их основе [1-3]. Циклический движитель – это устройство формирующее поток газа или жидкости, состоящее из ротора – набора лопастей, вращающихся по круговой орбите вокруг оси ротора и поворачивающихся вокруг собственной оси, системы управления углом атаки лопастей и двигательной установки (рис.1).

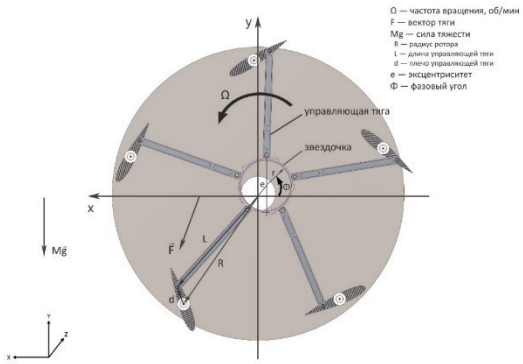


Рис. 1. Кинематический механизм управления лопастями циклического движителя.

В институте теплофизики СО РАН проведен цикл расчетно-экспериментальных исследований аэродинамики циклического движителя. Созданы экспериментальные стенды для анализа структуры формируемого ротором потока (рис. 2) и изучения тягово-энергетических характеристик (рис. 3).



Рис. 2. Визуализация потока, формируемого циклическим движителем.

Разработана и адаптирована по данным эксперимента математическая модель пространственной турбулентной аэродинамики ротора. Проведены расчетные исследования влияния конструкции ротора, параметров кинематического механизма, количества, типа профиля и размера лопастей на формируемую тягу и потребляемую мощность.

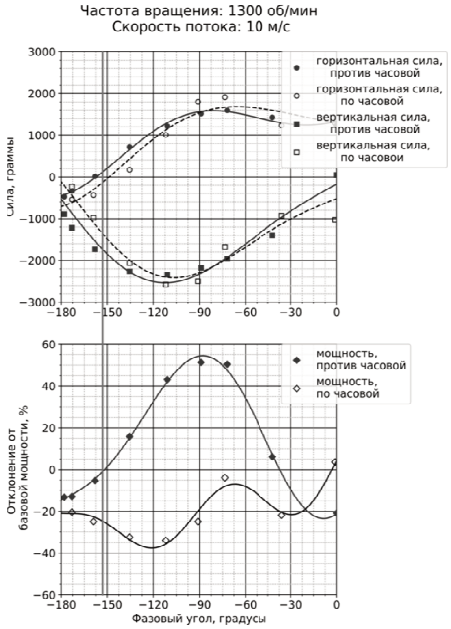


Рис. 3. Визуализация потока, формируемого циклическим движителем.

Пример структуры потока в области ротора показан на рис. 4.

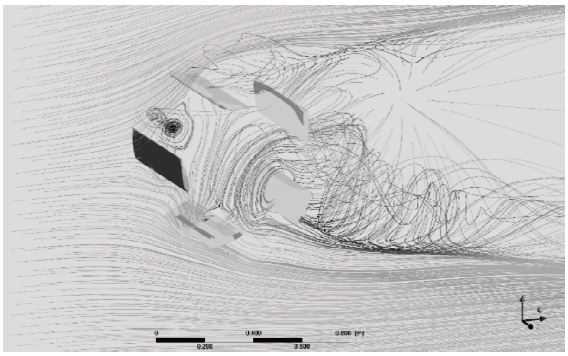


Рис. 4. Поле давлений на лопастях и структура потока возле ротора.

Проведенные исследования позволили предложить пути оптимизации конструкции циклического движителя для улучшения его тягово-энергетических характеристик.

Список литературы

1. Xisto C.M., Leger J.A., Páscoa J.C., Gagnon L., Masarati P., Angeli D. and Dumas A. Parametric Analysis of a Large-Scale Cycloidal Rotor in Hovering Conditions. Journal of Aerospace Engineering. V. 30. January 2017.
2. Dykas S. et al. Numerical and experimental investigation of the fan with cycloidal rotor. Mechanics and Mechanical Engineering. 2018. Т. 22. № 2.
3. Gagnon L., Morandini M., Quaranta G., Muscarello V., Masarati P. Aerodynamic models for cycloidal rotor analysis. Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal. V. 88. No 2. P. 215–231.

УДК 532.5

МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ОБРАТНЫХ ПРИСТЕНОЧНЫХ ТЕЧЕНИЙ В БЕЗГРАДИЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

Зарипов Д.И.

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

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

Долгое время существование явления обратного пристеночного течения (ОПТ) в безградиентном турбулентном пограничном слое казалось невозможным. Однако в работах [1-4] его существование было подтверждено как теоретически, так и экспериментально, но механизм его возникновения все еще не ясен. В литературе можно найти различные объяснения формирования ОПТ в зависимости от типа потока. Например, в работах [3] и [4] их связывают с пристеночными квази-продольными (КП) вихревыми структурами, наклоненными относительно среднего направления потока, однако их связь с крупномасштабными вихревыми структурами, существующими в логарифмической области, отличается.

В настоящем исследовании, предлагается новый механизм формирования ОПТ, наблюдаемый при развитом турбулентном течении воздуха в канале длиной 6 м с сечением $H\times H$=0,1×0,1 м^2 при числе Рейнольдса Re=UH/ν=6300, где U=0,95 м/с – среднерасходная скорость. С методикой проведения экспериментов можно ознакомиться в [5].

Было обнаружено 8 событий ОПТ с общей продолжительностью t^+=7,18 на расстоянии y^+=0,31 от стенки, что соответствует 0,0063% вероятности их появления. Детальный анализ осциллограмм скорости (рис. 1) позволил выделить несколько характерных зон. Зона I связана с крупномасштабной вихревой структурой, замедленной по отношению к среднему локальному течению. Его временной масштаб, равный 40t^+, соответствует примерно 400x^+, что согласуется с [1]. На рис. 1 можно видеть чередующиеся зоны нисходящих (II) и восходящих (III) движений, которые, вообще говоря, являются сторонами КП структуры. Можно заметить, что конвективная скорость этой структуры (зоны II и III посередине рис. 1) немного ниже среднего значения скорости на том же расстоянии от стенки (y^+=13). Это указывает на то, что ОПТ, как правило, расположено в хвостовой части замедленной крупномасштабной вихревой структуры. Однако в работе [4] они наблюдались по всей замедленной области. По-видимому, это связано с тем, что при воздействии положительного градиента давления поток уже достаточно замедлен, чтобы вызывать событие ОПТ. В условиях отсутствия градиента давления, торможение потока, вызванное крупномасштабной вихревой структурой (зона I), недостаточно сильное, поэтому требуется дополнительная сила, чтобы вызвать обратное течение [1]. Действительно, на рис. 1 можно наблюдать зону IV с сильным движением к стенке, за которым снова следует протяжённая замедленная область со слабым восходящим движением (зона V).

Таким образом, события ОПТ, наблюдаемые в канале с развитым турбулентным профилем скорости, образованы в результате сложного взаимодействия КП структуры с двумя крупномасштабными вихревыми структурами, идущими друг за другом. Согласно предлагаемому механизму, ОПТ формируются в результате попадания КП структуры в хвостовую часть замедленной области течения и её прижатия к стене другой крупномасштабной вихревой структурой, приближающейся к ней сзади.

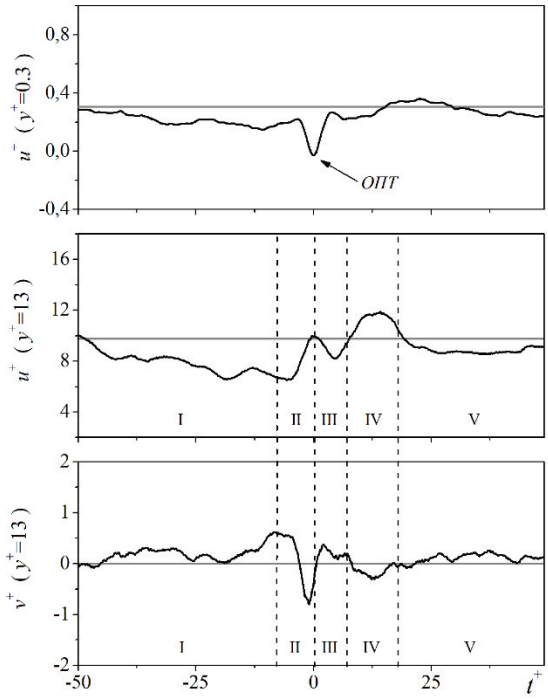


Рис. 1 Осредненные осциллограммы продольной – u *и вертикальной* – v *компонент скорости связанные с явлениями ОПТ при* y^+ *= 0,3 и 13. Темно-серые горизонтальные линии обозначают средние значения компонент скорости.*

Список литературы

1. Chin R.C., Monty J.P., Chong M.S., Marusic I. Conditionally averaged flow topology about a critical point pair in the skin friction field of pipe flows using direct numerical simulations // Phys. Rev. Fluids. 2018. V. 3. No. 11. P. 114607.
2. Vinuesa R., Örlü R., Schlatter P. Characterization of backflow events over a wing section // J. Turbul. 2017. V. 18, No. 2. P. 170–85.
3. Lenaers P., Li Q., Brethouwer G., Schlatter P., Örlü R. Rare backflow and extreme wall-normal velocity fluctuations in near-wall turbulence // Phys. Fluids. 2012. V. 24. No. 3. P. 035110.
4. Bross M., Fuchs T., Kähler C.J. Interaction of coherent flow structures in adverse pressure gradient turbulent boundary layers // J. Fluid Mech. 2019. V. 873. P. 287–321.
5. Zaripov D., Li R., Saushin I. Extreme events of turbulent kinetic energy production and dissipation in turbulent channel flow: particle image velocimetry measurements // J. Turbul. 2020. V. 21, No. 1 P. 39–51.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 19-79-30075)

УДК 612.13

ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В МЕСТЕ СОЕДИНЕНИЯ КРОВЕНОСНОГО СОСУДА С ПРОТЕЗОМ

Иванова Я.Ф.[1], Юхнев А.Д.[1], Гатаулин Я.А.[1*], Смирнов Е.М.[1], Врабий А.А.[2], Вавилов В.Н.[2]

[1] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
[2] Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И.П. Павлова

e-mail: yakov_gataulin@mail.ru

Одной из актуальных проблем сосудистой хирургии на сегодняшний день является атеросклероз сосудов – нарастание холестериновых бляшек внутри сосуда, при котором около четверти случаев являются летальными. Наиболее подвержены данному заболеванию артерии нижних конечностей. При сильном зарастании сосуда единственным методом лечения является его протезирование, применяемое в клинической практике с конца XIX века. Однако даже при успешно проведенном протезировании возникают послеоперационные осложнения в виде зарастания имплантированного протеза, вызванного реакцией сосудистых тканей на механическое повреждение, искусственные материалы и существенное нарушение структуры кровотока [1].

Исследования показывают, что основными факторами, влияющими на зарастание сосудистых протезов, являются сдвиговые напряжения на стенке [2] и индекс их колебаний [3]. Современные методы численных расчетов течения крови в моделях сосудистых протезов могут оказать значительную помощь в усовершенствовании конструкции протезов и в обосновании оптимальных параметров их имплантации [4].

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования течения крови в соединении протеза с бедренной артерией (анастомозе), а также его валидация с привлечением данных физического эксперимента.

Численное моделирование проводилось в трехмерной постановке – посредством решения уравнений Навье-Стокса конечно-объемным методом в программном пакете ANSYS CFX. Была построена модель соединения протеза с артерией (рис. 1), выполненного по типу «конец протеза в бок сосуда». Модель имеет два выхода: выход 1 обеспечивает основной поток по бедренной артерии, а выход 2 – доступ к коллатеральным сосудам. Протез и сосуд имеют внутренний диаметр D = 6 мм. Рассматривалось пульсирующее течение крови с периодом пульсаций 0.9 с и максимальной среднерасходной скоростью Vb = 70 см/с. Соотношение расходов на выходах $Q_1/Q_2 = 4$. Характерное (максимальное) число Рейнольса составляет 1050, число Уомерсли – 4.

Для проведения измерений была изготовлена модель соединения протеза с бедренной артерией из фотополимера, идентичная расчетной. Параметры эксперимента согласованы с расчетом; кровь моделировались водным раствором глицерина. Измерения полей продольной и поперечной компонент скорости проводились ультразвуковыми доплеровскими методами.

Анализ расчетных полей скорости показал наличие обратного течения, а также формирование четырех вихрей непосредственно за местом соединения протеза и сосуда (рис. 1). Ниже по потоку течение трансформируется в двухвихревое, которое сохраняется до выхода из модели. Результаты ультразвуковых измерений проекции поперечной скорости на ось ультразвукового датчика (А-А на рис.1) подтверждают наличие четырех вихрей сразу за областью шва (рис. 2).

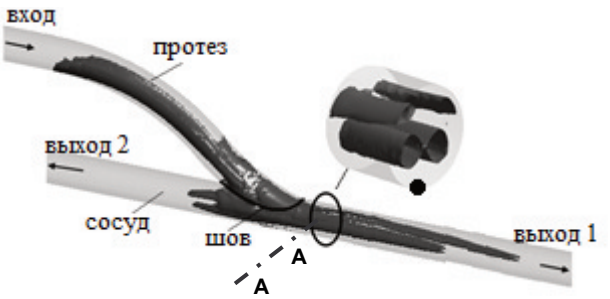


Рис. 1. Изоповерхность Q-критерия в модели анастомоза в момент наибольшего расхода.

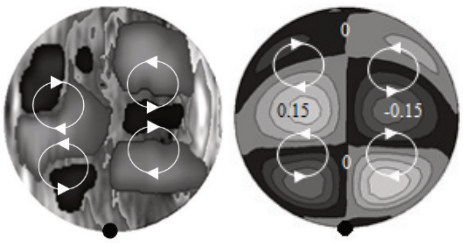


Рис. 2. Измеренное (слева) и расчетное (справа) поля проекции поперечной скорости на ось ультразвукового датчика в момент наибольшего расхода (сечение показано на рис. 1).

Список литературы

1. Haimovici's Vascular Surgery / Ed. E. Ascher. Oxford, UK: Wiley-Blackwell. 2012. 1317 p.
2. Bonert M., Leask R., Butanyet J. et al. The Relationship Between Wall Shear Stress Distributions and Intimal Thickening in the Human Abdominal Aorta // BioMed. Eng. 2003. № 2. 14 p.
3. Ku D.N., Giddens D.P., Zarins C.K. et al. Pulsatile Flow and Atherosclerosis in the Human Carotid Bifurcation // Arterioscler. Thromb. Vasc. Biol. 1985. № 5. P. 293–302.
4. Kabinejadian F. et al. Numerical Assessment of Novel Helical/Spiral Grafts with Improved Hemodynamics for Distal Graft Anatomizes // PLoS ONE. 2016. V. 11. № 11. 22 p.

Работа поддержана РНФ (грант № 20-65-47018)

УДК 641.454.2

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В КАНАЛАХ С ПОМОЩЬЮ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Ильченко М.А., Французов М.С.

Государственный научный центр Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова», Москва

e-mail: mfrancuzov@yandex.ru

Одним из сдерживающих факторов при создании высокоэффективных теплообменных аппаратов является ограничение в массогабаритных характеристиках. Применение в этих условиях различных средств интенсификации теплообмена является острой необходимостью. При этом должна производиться оценка эффективности одного и того же средства в различных условиях и разных средств между собой. Критерием эффективности для пассивных средств интенсификации может быть сокращение площади теплообмена или массы устройства, которое оценивается различными критериями, например, [1].

В настоящем исследовании представлены результаты сравнения четырех методов пассивной интенсификации теплообмена при турбулентном течении воздуха в цилиндрическом канале: за счет возбуждения акустических колебаний, за счет погружения внутрь канала проволочной спирали, скрученной ленты и ленты со спиралью одновременною.

В первом случае в канале были установлены 4 группы плоских пластин, при обтекании которых потоком воздуха наблюдался периодический срыв вихрей с их задних кромок. Когда частота срыва вихрей приближается к одной из резонансных частот канала с пластинами, происходит возбуждение автоколебаний звуковых и ультразвуковых частот [2]. Возбуждение автоколебаний происходит без гистерезиса при изменении расхода в двух различных направлениях: возрастании и уменьшении. На режимах развитых автоколебаний спектры колебаний давления содержат одну ярко выраженную дискретную составляющую в зависимости от числа Рейнольдса Re. В текущем исследовании наблюдалось три таких локальных области:

– частота f_1=11166 Гц, соответствует симметричному распределению амплитуды над профилем и второй (m=2) тангенциальной моде колебаний с двумя узлами давления в виде диаметральных плоскостей вне профилей;

– частота f_2=19197 Гц соответствует несимметричному распределению амплитуды над профилем и первой (m=1) тангенциальной моде колебаний с одним узлом давления в виде диаметральной плоскости вне профилей

– частота f_3=26137 Гц и соответствует несимметричному распределению амплитуды над профилем и второй (m=2) тангенциальной моде колебаний с двумя узлами давления в виде диаметральных плоскостей вне профилей.

Относительная амплитуда пульсаций давления <P>/P для течения в трубке с пластинами превышает относительную амплитуду турбулентных пульсаций давления потока в гладком канале в 1,5…3 раза. При срыве автоколебаний, амплитуды пульсаций давления резко уменьшаются.

Для течения в гладкой трубке и трубке с лентой и спиралью спектр сигнала пульсаций давления имеет характерный для развитого турбулентного течения непрерывный вид распределения спектральных амплитуд пульсаций давления. Максимальные амплитуды регистрируются в низкочастотной области. Относительная амплитуда пульсаций давления в трубке с лентой и спиралью превышает относительную амплитуду турбулентных пульсаций давления потока в гладком канале в 1,2…1,4 раза.

Числа Нуссельта при интенсификации теплообмена в трубке с лентой и спиралью превышают их величины при нагреве потока в трубке с пластинами только в областях срыва автоколебаний.

Были исследованы ещё два способа интенсификации теплообмена в трубке: с проволочной спиралью и со скрученной лентой по отдельности. Увеличение коэффициентов гидравлических сопротивлений для каждого из этих способов практически было таким же, как и в трубке с пластинами. Числа Нуссельта возрастали на меньшую величину чем при интенсификации теплообмена в трубках с пластинами, а также лентой и спиралью, установленных совместно.

При сравнении способов интенсификации теплообмена установлено:

– числа Нуссельта в трубке с профилями превышают их величины в гладкой трубке в 1,057÷2,052 раза, а в трубке с лентой и спиралью в 1,88÷2,076 раза;

– коэффициенты гидравлических сопротивлений возрастают в трубке с профилями в 6,91÷9,04 раз, а в трубке с лентой и спиралью в 10,2÷11,02 раз;

Оценка эффективности способов интенсификации теплообмена акустическими колебаниями в трубке с профилями и в трубке с лентой и спиралью с использованием критерия $(Nu_{ин}/Nu_{гл})^{3,5}>(\zeta_{ин}/\zeta_{гл})$ также показала более высокую эффективность интенсификации теплообмена акустическими колебаниями в трубке с профилями.

Список литературы

1. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Копп И.Э., Мякочин А.С. Эффективные поверхности теплообмена. М.: Энергоатомиздат. 1998.
2. Александров В.Ю., Арефьев К.Ю., Ильченко М.А. Экспериментальное исследование влияния акустико-вихревых автоколебаний на процесс разрушения недорасширенной сверхзвуковой струи в затопленном пространстве // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23. № 4. С. 533–542.

УДК 532.135

ТЕПЛООБМЕН ПРИ ТЕЧЕНИИ ЖИДКОСТИ ФАН-ТЬЕН ТАННЕРА В ПЛОСКОЙ ЩЕЛИ

Кадыйров А.И., Вачагина Е.К.

Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ КазНЦ РАН, Казань
e-mail: aidarik@rambler.ru

Для описания нелинейновязких и вязкоупругих свойств материалов в последнее время предпочтение отдается реологическим моделям, основанным на строении молекул полимерных материалов. Уравнения, соответствующие данным моделям, включают в себя производные по времени от тензоров напряжений и носят названия релаксационных уравнений состояния. Одной из такой моделью является модель Фан-Тьен- Таннера [1-2], которая хорошо зарекомендовала себя на практике. Отметим, что использование одномодальных уравнений состояний [3-4] уменьшает точность адекватного описания реологического поведения материалов в широком диапазоне изменения режимных параметров.

В настоящей работе получено аналитическое решение задачи о теплообмене при течении вязкоупругой линейной жидкости Фан-Тьен-Таннера (ФТТ) в плоской щели при использовании полного линейного 4-х модального реологического уравнения состояния ФТТ с ньютоновской составляющей напряжения.

$$\begin{cases} \boldsymbol{\sigma} = \sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{\sigma}_{Vi} + \boldsymbol{\sigma}_N, \ \boldsymbol{\sigma}_N = 2\mu_N \boldsymbol{D}, \\ \lambda_i \left(\overset{\nabla}{\boldsymbol{\sigma}}_{Vi} + \xi_i \left(\boldsymbol{D} \cdot \boldsymbol{\sigma}_{Vi} + \boldsymbol{\sigma}_{Vi} \cdot \boldsymbol{D} \right) \right) + \\ g_i \boldsymbol{\sigma}_{Vi} = 2\mu_{Vi} \boldsymbol{D}, \ g_i = 1 + \dfrac{\varepsilon_i \lambda_i}{\mu_{Vi}} tr\left(\boldsymbol{\sigma}_{Vi}\right), \end{cases}$$

$\overset{\nabla}{\boldsymbol{\sigma}}$ верхняя конвективная производная тензора $\boldsymbol{\sigma}$; $\boldsymbol{D}$ - тензор скоростей деформаций; $\boldsymbol{\sigma}_N, \boldsymbol{\sigma}_{Vi}$ - вязкая и упругие составляющие девиатора тензора напряжений $\boldsymbol{\sigma}$; μ_N, μ_{Vi} - вязкости; λ_i - времена релаксации; ξ_i, ε_i - реологические параметры; $\boldsymbol{V}$ - вектор скорости.

Решение получено при следующих допущениях: единственная осевая компонента скорости V_z, зависит только от поперечной переменной y, где x, y, z независимые переменные декартовой системы координат с осью z, направленной вдоль оси канала; теплофизические свойства жидкости (плотность, коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость) и параметры реологической модели ФТТ в заданном диапазоне изменения температур меняются незначительно; перенос энергии в осевом направлении за счет теплопроводности пренебрежимо мал по сравнению с таким же переносом в поперечном направлении и по сравнению с конвективным переносом тепла; на стенках трубы задано постоянное значение температуры; на входе в трубу задано начальное значение температуры; диссипативное тепловыделения не учитывается.

Принятые допущения позволяют получить отдельно решение гидродинамической части задачи, которое затем используется для решения уравнения переноса энергии.

Разработанное решение, в отличие от [5], получено в параметрическом виде аналогично [6]. Основной особенностью такого подхода является переход в уравнении переноса энергии к новой независимой переменной – параметру вместо использования традиционной пространственной переменной.

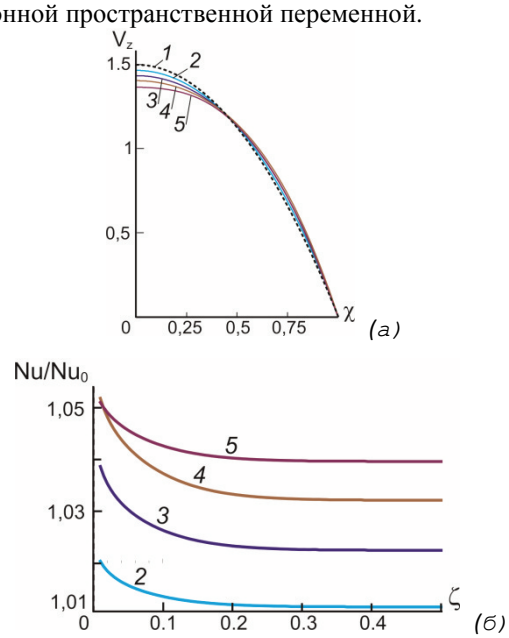


Рис. 1. (а) Профили осевой скорости в поперечном сечении; (б) Распределение отношения Nu / Nu_0 по длине трубы для различных значений числа Вайсенберга: 1 – Ньютоновская жидкость, 2 - $We = 0.71$, 3 - $We = 1.24$; 4 - $We = 2.14$; 5 - $We = 10.26$

Список литературы

1. Phan-Thien N., Tanner R.I. A new constitutive equation derived from network theory // J. Non-Newt. Fluid Mech. 1977. No. 2. P. 353–365.
2. Phan-Thien N. A nonlinear network viscoelastic model // J. Rheol. 1978. No. 22. P. 259–283.
3. Oliveira Paulo J., Pinho Fernando T. Analytical solution for fully developed channel and pipe flow of Phan-Thien-Tanner fluids // J. Fluid Mech. 1999. Vol. 387. P. 271–280.
4. Alves M.A., Pinho F.T., Oliveira P.J. Study of steady pipe and channel flows of a single-mode Phan-Thien-Tanner fluid // J. Non-Newt. Fluid Mech. 2001. No. 101. P. 55–76.
5. Coelho P.M., Pinho F.T., Oliveira P.J. Thermal entry flow for a viscoelastic fluid: the Graetz problem for the PTT model // Int. J. Heat Mass Transfer. 2003. No. 46. P. 3865–3880.
6. Ananyev D.V., Vachagina E.K., Kadyirov A.I., Kainova A.A., Osipov G.T. Determination of existence conditions for the solutions with a weak discontinuity for simplest viscoelastic fluid flows // Fluid Dynamics. 2014. Vol. 49, No. 5, P. 576–584.

Публикация осуществлена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан в рамках научного проекта № 18-41-160007

УДК 532.135

ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ГИЕЗЕКУСА ПРИ ОБТЕКАНИИ ЦИЛИНДРА МЕЖДУ ДВУМЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ПЛАСТИНАМИ

Кадыйров А.И.[1], Караева Ю.В.[1], Зарипов Р.Р.[2], Вачагина Е.К.[1]

[1] Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ КазНЦ РАН, Казань
[2] ИММ – обособленное структурное подразделение ФИЦ КазНЦ РАН, Казань

e-mail: aidarik@rambler.ru

В настоящей работе представлены численные результаты течения вязкоупругой жидкости Гиезекуса [1] при обтекании цилиндра между двумя пластинами [2]. Для численной реализации поставленной задачи в пакете AnsysPolyflow предварительно определены параметры четырехмодальной модели Гиезекуса для водных растворов полиакриламида с концентрациями 2500 ppm, 5000 ppm and 10 000 ppm.. При этом спектр времени релаксации (λ_i, η_i) определен по результатам осцилляционных тестов при малых амплитудах [3], а нелинейный параметр α_i определен из соотношения, связывающего касательные напряжения от скорости сдвига при крутильном течении в зазоре между двумя дисками (система плит-плита для реометров):

$$2b_i^2\lambda_i\dot{\gamma} - 2b_i\lambda_i\dot{\gamma}\sqrt{b_i^2 - 4\alpha_i^2\tau_i^2} + \\ + \left(\alpha_i\sqrt{b_i^2 - 4\alpha_i^2\tau_i^2 + 8\alpha_i b_i\lambda_i\dot{\gamma}\tau_i} + \alpha_i\sqrt{b_i^2 - 4\alpha_i^2\tau_i^2}\right)\tau_i - \\ -2\alpha_i\lambda_i\dot{\gamma}b_i^2 = 0 \qquad (1)$$

где $r\chi_i = \dfrac{\omega r\lambda_i}{h} = \dot{\gamma}\lambda_i$ – произведение скорости сдвига на время релаксации для каждой моды.

На рисунке 1 представлены результаты апроксимации кривой вязкости для водных растворов полиакариламида четырехмодальной моделью Гиезекуса.

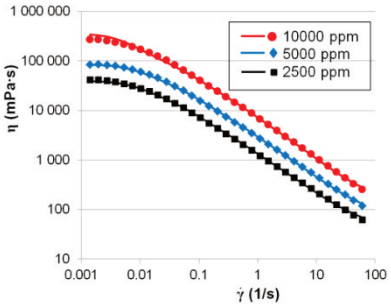


Рис. 1. Зависимость вязкости от скорости сдвига (эксперимент и модель Гиезекуса).

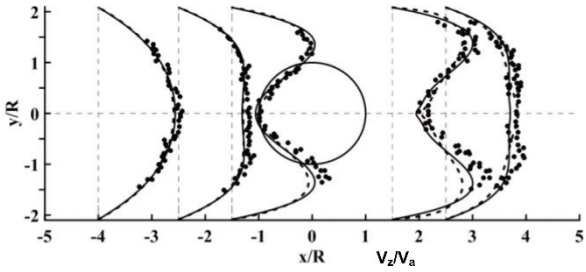


Рис. 2. Безразмерная осевая составляющая вектора скорости в поперечных сечениях канала (Wi=2.896): сплошная линия – AnsysPolyflow (LDPE), точки – экспериментальные данные (LDPE, [9]), пунктирная линия – AnsysPolyflow (5000 ppm PAA).

Выполненный комплекс численных исследований течения вязкоупругой жидкости при обтекании цилиндра между двумя пластинами согласуется с экспериментальными данными. Использование критерия Вайсенберга позволило сопоставить результаты течения расплава полиэтилена низкой плотности (LDPE) при 170 градусах Цельсия и 5000 ppm водного раствора полиакриламида (PAA) при температуре 20 градусов. Полученные параметры для водных растворов полиакриламида могут быть использованы для физического эксперимента, имитирующего течение расплава полимера в экструдере.

Список литературы

1. Giesekus H.J. Non-Newton. Fluid Mech. 1982. No. 11. P. 69–109.
2. Verbeeten W.M.H, Peters G.W.M and Baaijens F.P.T. J. Non-Newton Fluid. 2002. No. 108. P. 301-326
3. Calin A., Wilhelm M. and Balan C. J. Non-Newton Fluid. 2010. No. 165. P. 1564–1577.

Метод определения нелинейного параметра модели Гиезекуса выполнен при финансовой поддержке гранта РФФИ №19-01-00375. Численные исследования течения вязкоупругой жидкости при обтекании цилиндра выполнены при финансовой поддержке гранта РНФ №19-11-00220.

УДК 536.24:66.045

ОБРАЗОВАНИЕ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР ПРИ СМЕШАННОЙ КОНВЕКЦИИ ВОЗДУХА В ВЫТЯЖНОЙ ШАХТЕ НАД ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ ПУЧКОМ ИЗ ОРЕБРЕННЫХ ТРУБ

Карлович Т.Б., Сухоцкий А.Б., Данильчик Е.С.

Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь

e-mail: tbkar@mail.ru

В работе рассматривается турбулентное течение воздуха в вытяжной шахте над горизонтальным четырехрядным оребренным пучком. Пучки из оребренных труб используются в качестве основного элемента теплообменных устройств, позволяющих отводить большое количество теплоты от охлаждаемой жидкости. Для интенсификации процесса теплообмена над пучком может устанавливаться шахта [1], в которой создается воздушная тяга. В работе [2] показано, что при определенных условиях в шахте возникают обратные потоки воздуха из окружающей среды (гейзерные течения), что может ухудшить теплообменные характеристики пучка. Для объяснения этого явления предлагается использовать решение задачи Рэлея-Бенара для горизонтального слоя жидкости, находящегося в поле силы тяжести и подогреваемого снизу. Решением задачи являются устойчивые периодические структуры (ячейки Рэлея-Бенара), которые могут представляться в виде конвективных валов, ячеек квадратной формы, треугольной и гексагональной структуры и др. в зависимости от соотношения между волновыми числами, задающими распространение возмущений. Критерием устойчивости решения задачи Рэлея-Бенара является затухание возмущений во времени, что приводит к существованию минимального значения числа Рэлея, когда возможно появление периодических структур в жидкости:

$$\mathrm{Ra}_{\min}^{cr} = \frac{27}{4} n^4 \pi^4, \qquad (1)$$

где n – порядок возбуждаемой собственной моды.

Для наблюдения гейзерных течений использовалась экспериментальная установка с четырехрядным горизонтальным шахматным пучком, состоящим из 22 оребренных труб с поперечным s1 = 64 мм и продольным s2 = 55,4 мм шагом. Трубы со спиральными накатными ребрами имели наружный диаметр d = 56 мм, шаг ребра s = 2,5 мм, толщину ребра 0,5 мм; диаметр трубы составлял d0 = 26,8 мм, длина трубы равнялась l = 300 мм. Число Рэлея Ra = 168000 соответствовало порядку n = 4. Вытяжная шахта высотой H = 52 см с прямоугольным основанием 31×38 см монтировалась над пучком. В шахте на высоте 37 см устанавливалась жесткая рамка со свободно свисающими легкими нитями в продольном и поперечном направлении шахты с числом нитей в одном направлении n = 4. На рис. 1 продемонстрировано положение нитей в различные моменты времени. По направлению деформации нитей можно судить о направлении воздушных потоков в шахте. Так, на рис. 1а отчетливо видно, что холодный воздух задувается в шахту с четырех сторон возле стенок. На рис.1б деформация сетки видна в центре, на рис. 1в наблюдается смещение задувающего потока воздуха ближе к боковой поверхности шахты, причем на крайней левой нити заметны волны. На рис. 1г показано дальнейшее смещение центра воздуха в правую сторону, также на нем хорошо заметны волны на крайней правой нити, свидетельствующие о наличии близко расположенных противоположных по направлению воздушных потоков в шахте.

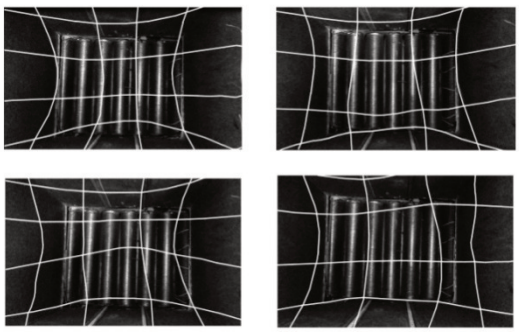


Рис. 1. Квазипериодические структуры воздушных потоков в шахте над четырехрядным пучком.

Общая интерпретация возникновения периодических структур связана с возникновением постоянно действующего температурного градиента в жидкости. В случае малого температурного градиента внутри небольшого выделенного объема жидкости начинается диффузия из-за возникшей неоднородности плотности, сопровождающаяся выравниванием плотности и температуры в объеме. Однако, если температурный градиент велик, диффузия не успевает привести к однородному распределению температуры по объёму и вследствие действия конвективных сил организуется направленное движение жидкости – подъем по центру более теплой жидкости и опускание по периферии холодной жидкости в возникающей конвективной ячейке. В случае дальнейшего роста температурного градиента происходит распад существующих конвективных ячеек на более мелкие структуры, а затем осуществляется переход к хаотическому режиму течения жидкости.

В работе рассмотрены гейзерные течения воздуха в вытяжной шахте над горизонтальным оребренным пучком на основе задачи Рэлея. Предложена интерпретация явления «опрокидывания» тяги в шахте на основе конвективных ячеек Рэлея-Бенара.

Список литературы

1. Мильман О.О. Экспериментальное исследование теплообмена при естественной циркуляции воздуха в модели воздушного конденсатора с вытяжной шахтой // Теплоэнергетика. 2005. № 5. С. 16–19.
2. Сухоцкий А.Б., Маршалова Г.С. Особенности гравитационного течения нагретого воздуха в вытяжной шахте над многорядным оребренным пучком // ИФЖ. 2019. Т. 92. № 3. С. 1–7.

УДК 536.24

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В КРУГЛОЙ ТРУБЕ С ИСКУССТВЕННОЙ ШЕРОХОВАТОСТЬЮ

Королева А.П.[1,2], Кузьменков Н.В.[1,3], Французов М.С.[1,3]

[1] Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Москва
[2] Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва
[3] МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

e-mail: nickuzmenkov@yahoo.com

Текущий уровень развития методов машинного обучения (обучение с учителем, генетический алгоритм, нейроэволюция и т.д.) позволяет применять искусственные нейронные сети (ИНС) для решения инженерных задач с нелинейной зависимостью входных и выходных данных, в которых нейронные сети показывают наибольшую эффективность [1]. Обобщение больших массивов опытных данных в работах, посвященных анализу различных инженерных проблем, методами машинного обучения позволит создать новое, эффективное и экономичное средство их решения с перспективами промышленного применения.

Одной из таких проблем является интенсификация теплообмена. Сдерживающими факторами создания высокоэффективных теплообменных аппаратов являются растущие требования различных отраслей современной промышленности к их мощности при накладываемых ограничениях на массогабаритные характеристики. Наиболее целесообразным и экономически выгодным решением этой проблемы может быть использование средств интенсификации теплообмена [2]. Применяемые средства должны быть эффективными, то есть не допускающими роста потерь давления, увеличения массы и габаритов, ухудшения технологичности и т.д.

В трубчатых теплообменниках с турбулентным течением теплоносителя наиболее простым методом интенсификации является создание на поверхности искусственной шероховатости, как средства управляемого воздействия на поток. При определенных условиях [3] удается увеличить турбулентную интенсивность преимущественно в пристенной зоне, где срабатывается от 85% до 99% температурного напора в зависимости от числа Прандтля теплоносителя [4], что приводит к росту теплоотдачи без значительного увеличения гидравлического сопротивления. При правильном подборе материалов к этому эффекту может добавляться незначительный вклад от развития поверхности.

В данной работе реализован алгоритм обучения с учителем (supervised learning) глубокой ИНС на данных численного моделирования интенсифицированного теплообмена в круглой трубе при турбулентном течении воздуха, фреона (R22) и воды засчет дискретной искусственной шероховатости периодически расположенными выступами прямоугольной формы методами вычислительной гидродинамики. В работе варьировались высота и шаг между выступами, скорость и род теплоносителя, материал трубы. Исследовались тепловые и гидравлические характеристики, а также эффективность средства интенсификации с помощью показателя, предложенного в [2] для оценки уменьшения поверхности теплообмена и снижения массы теплообменного устройства. Выявлено влияние каждого из варьируемых параметров на тепловые и гидравлические характеристики, продемонстрированы поля температур и картины течения в пристенной области потока.

Данные расчетов при 5880 различных совокупностях варьируемых параметров использованы обучения глубокой ИНС, способной качественно предсказывать данные как на рассмотренных, так и на нерассмотренных ранее совокупностях и делать заключение об эффективности интенсификации по критерию [2], базируясь только на исходных данных. Так, при выборе рабочего тела и диапазона чисел Рейнольдса или допустимого уровня гидравлических потерь при помощи данной ИНС можно с достаточной достоверностью определить наиболее эффективные геометрические параметры искусственной шероховатости без повторения серий численных расчетов. Обученная ИНС может быть скорректирована на новых сериях данных как численного, так и натурного эксперимента. Успехи данного подхода и малая ресурсоемкость алгоритма заранее обученной нейронной сети позволяют судить перспективах его применения в промышленности.

Список литературы

1. Elsayed K., Lacor C. Modeling, analysis and optimization of aerocyclones using artificial neural network, response surface methodology and CFD simulation approaches // Powder Technology. 2011. Vol. 212. P. 115–133.
2. Дрейцер Г.А. Проблемы создания высокоэффективных трубчатых теплообменных аппаратов // Теплоэнергетика. 2006. № 4. С. 31–38.
3. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А. Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. М.: Машиностроение. 1990. 208 с.
4. Мигай В.К. Моделирование теплообменного энергетического оборудования. Л.: Энергоатомиздат. 1987. 263 с.

УДК 536.242

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ НА ТЕПЛООТДАЧУ В СПИРАЛЬНОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ

Королева А.П.[1,2], Французов М.С.[1]

[1] Государственный научный центр Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова», Москва
[2] Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Москва

e-mail: anastykoroleva@mail.ru

Теплообменники спирального типа широко используются в различных областях промышленности. Это обусловлено тем, что теплоотдача в таких теплообменниках высока по сравнению с теплообменниками, в которых используются прямые трубы (в сравниваемых объемах).

Особое место спиральные теплообменники занимают в системе испытательного стенда перспективных авиационных двигателей, так как стандартная запорно-регулирующая арматура, входящая в состав стендовых систем, не допускает эксплуатации с высокотемпературными компонентами. В связи с этим возникают высокие требования к точности определения тепловых и гидравлических характеристик стендовых теплообменников при стационарных и нестационарных режимах функционирования.

Основная цель данного исследования — это выявление характерных особенностей течения и теплообмена, получение тепловых и гидравлических характеристик и полей термогазодинамических параметров для спирального теплообменника. Работа включает два этапа: проведение 3-х мерного численного моделирования и сравнение с данными, полученными, в результате экспериментальных исследований.

В настоящей работе выполнялось численное моделирования спирального теплообменника, полученного для расхода газа 0,1…0,4 кг/с и его охлаждения от температуры 1800 К до 400 К [1]. Геометрия расчетной области и пример расчетной сетки приведены на рис. 1. Задача рассматривалась в сопряженной постановке, поэтому расчетная область разделена на три подобласти: межтрубного пространство (МТП) – течение горячего газа, внутритрубное пространство (ВТТ) – течение воды в трубе, и твердая стенка. В МТП моделировалось вязкое турбулентное течение воздуха с переменными теплофизическим свойствами, а в ВТТ — течение воды с теплофизическими свойствами, зависящими от температуры. Решалась система нестационарных уравнений Навье-Стокса, осредненных по Фавру, замыкаемая двухпараметричной моделью турбулентности и уравнением состояния идеального газа. В твердой среде решалось уравнение теплопроводности при постоянном коэффициенте теплопроводности 20 Вт/(м·К).

Исследование течения горячего воздуха в МТП проведено в широком диапазоне чисел Рейнольдса ($Re = 600…4\cdot10^5$), значение которых рассчитывалось по диаметру входа и параметрам газа во входном сечении.

Экспериментальные исследования проводились в спиральном теплообменнике в конфигурации противотока (вода – воздух). Массовый расход воды в трубном пространстве устанавливался 100 г/с и оставался неизменным в течение всего хода экспериментов. Варьировалась скорость воздуха. Температура воды на входе в трубу 288 К.

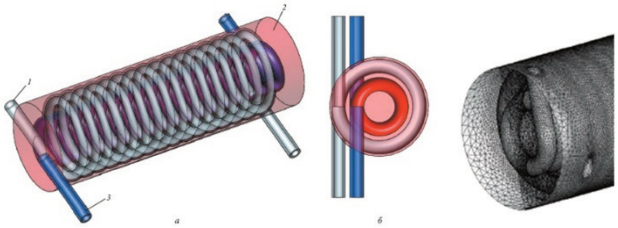


Рис.1. Геометрия расчетной области (а), вид сверху (б), расчетная сетка (в): 1 – внешняя змеевиковая труба, 2 – внутренняя змеевиковая труба, 3 – обечайка.

В результате проведенных исследований приведены численные и экспериментальные данные влияния числа Re на характеристики теплопередачи и течения. Показано, что интенсивность конвективного теплопереноса в МТП повышается с ростом числа Re. Для рассмотренных режимов течения подтверждена степенная зависимость числа Нуссельта от числа Re ($Nu \sim Re$). Увеличение перепада давления с ростом Re обусловлено нарастающей скоростью рабочего тела и интенсивностью трения на теплообменных поверхностях. На термогазодинамических картинах показаны особенности течения, например, на рис. 2 видно, что для малых чисел Re характерно наличие более высокой температуры в центре сечения, для больших чисел Re температуры увеличивается к периферии.

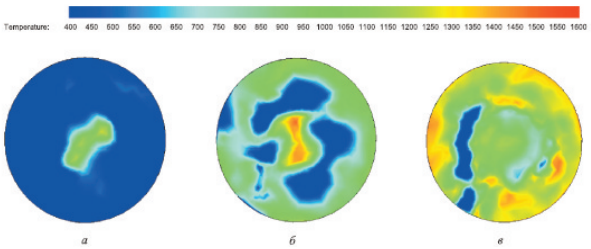


Рис. 2. Поля температуры воздуха, в выходном сечении при числе $Re = 10^3$ (а), $3\ 10^4$ (б), $4\ 10^5$ (в).

Обнаружено, что с повышением числа Re разница температур между входом и выходом МТП уменьшается, несмотря на то что коэффициент теплоотдачи повышается. Это связано с тем, что при увеличении числа Re расход газа растет быстрее, чем интенсивность теплообмена.

Список литературы

1. Фролов К.В. ред. Машины и аппараты химических и нефтехимических производств. Машиностроение. Энциклопедия. М: Машиностроение. Т. IV-12. 2004. 832 с.

УДК 532.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ ИЗОТРОПНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЯ КАРМАНА-ХОВАРТА

Кусюмов А.Н.[1], Михайлов С.А.[1], Кусюмов С.А.[1], Романова Е.В.[1]

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

e-mail: postbox7@mail.ru

Известно, что статистическая теория изотропной турбулентности позволяет провести полный кинематический анализ турбулентного переноса. Однако моделирование динамической турбулентности является более сложной задачей. Большинство теоретических анализов связано с использованием дополнительных гипотез, связанных с теорией подобия, либо с гипотезой обмена [1].

Изотропная турбулентность определяется условием статистической однородности средних значений компонентов скорости и их производных во всех направлениях. Дополнительным условием является незначительность среднего значения в течение периода времени, необходимого для осреднения. Это позволяет считать, что средние значения являются медленно меняющимися функциями времени.

Следуя этим допущениям, можно определить корреляционную функцию второго порядка между двумя компонентами скорости пульсаций в двух произвольных точках течения. Корреляция между тремя компонентами называется тройной корреляцией. Осредненные значения производных пульсаций скорости выражаются через производные тензора двойной корреляции. В конечном итоге этот процесс позволяет получить уравнение в частных производных Кармана-Ховарта [2], связывающее корреляционные функции второго и третьего порядка.

Формально уравнение Кармана-Ховарта не является замкнутым, поскольку оно содержит две неизвестные переменные: корреляционные функции второго и третьего порядка. Существует ряд публикаций, связанных с замыканием уравнения Кармана-Ховарта. Различные модели замыкания с функциональной связью между корреляционными функциями третьего и второго порядка.

В большинстве моделей замыкания, представленных в литературе корреляция третьего порядка моделируется как функциональное отношение, включающее производную корреляционной функции второго порядка по расстоянию между двумя точками (см., например, [3]). Рассматривается альтернативная модель замыкания в форме алгебраического уравнения

$$\overline{(\Delta u)^3} = -\bar{r}\alpha(\bar{r})\overline{(\Delta u)^2}^{3/2}, \qquad (1)$$

где $\overline{(\Delta u)^2}$ и $\overline{(\Delta u)^3}$ – функции второй и третьей корреляции, $\bar{r} = r/r_0$, r – пространственная координата r_0 – характерный размер, $\alpha(\bar{r})$ – произвольная гладкая функция. Точка $\bar{r} = 0$ является особой точкой уравнения Кармана-Ховарта. Во избежание данной особенности вводится переменная $\bar{z} = \bar{r}^2/2$. Результаты численного моделирования для турбулентного потока за двумерной сеткой из круглых цилиндров и сравнение с экспериментальными данными [4] представлены на рис. 1 и 2.

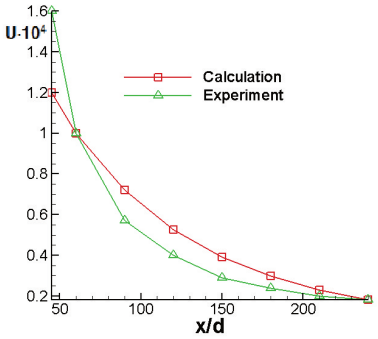


Рис. 1. Изменение корреляционной функции $U(\bar{x}, 0)$ второго порядка по безразмерной пространственной координате $\bar{x}$

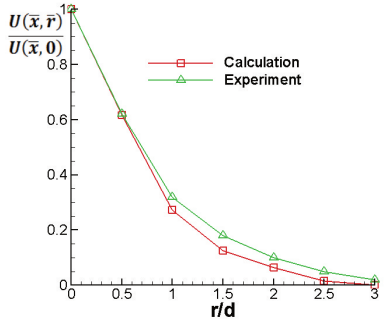


Рис. 2. Зависимость относительной корреляционной функции $\frac{U(\bar{x},\bar{r})}{U(\bar{x},0)}$ от радиальной координаты при $\bar{x} = 200$

Предложенная модель замыкания уравнения Кармана-Ховарта позволяет получить результаты моделирования корреляционной функции второго порядка, удовлетворительно совпадающие с экспериментальными данными. Дальнейшие исследования могут быть выполнены при изучении влияния начального распределения данных.

Список литературы

1. Hasselmann K. Zur Deutung der dreifachen Geschwindigkeitskorrelationen der isotropen Turbulenz // Deutsche Hydrographische Zeitschrift. 1958. Bd. 11. H. 5. S. 207–217.
2. Von Karman T. and Howarth L. On the Statistical Theory of Isotropic Turbulence// Proceedings of the Royal Society of London. Jan. 21, 1938. Series A, Mathematical and Physical Sciences, V. 164, No. 917, P. 192–215.
3. Баев М.К., Черных Г.Г. О численном моделировании динамики однородной изотропной турбулентности // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21. № 4. С. 459–466.
4. Костомаха В.А. Экспериментальное моделирование изотропной турбулентности // Нестационарные задачи механики сплошных сред (Динамика сплошной среды): сб. науч. тр. АН СССР. Сиб. отд-е. Ин-т гидродинамики. 1985. Вып. 70. С. 92–104.

Работа выполнена при поддержке Соглашения на выполнение государственного задания (№ 075-03-2020-051/3 от 09.06.2020, тема № fzsu-2020-0021) Министерства науки и высшего образования РФ

УДК 532.526.2, 536.24

ВЛИЯНИЕ ДЛИНЫ СВЕРХЗВУКОВОГО СОПЛА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОВОЙ СМЕСИ С МАЛЫМ ЧИСЛОМ ПРАНДТЛЯ В ОРЕБРЁННОЙ ОДИНОЧНОЙ ТРУБЕ ЛЕОНТЬЕВА

Макаров М.С.[1,2], Макарова С.Н.[1]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
[2] Новосибирский государственный технический университет

e-mail: msmakarov@itp.nsc.ru

Газодинамическое энергоразделение – перераспределение полной температуры между частями газового потока, протекающего через устройство энергоразделения, зависит от природы возникновения температурной неоднородности в этом потоке (вихревой эффект, резонансный эффект, диссипативный эффект и др. [1]) и определяется различными параметрами. В трубе Леонтьева основными параметрами, определяющими переток тепла от дозвуковой части газового потока к сверхзвуковой, являются коэффициент восстановления температуры со стороны сверхзвукового потока (число Прандтля), соотношение расходов через сверхзвуковой и дозвуковой каналы трубы (числа Маха) и термическое сопротивление разделительной стенки. Как было показано ранее [2-3], снижение термического сопротивления за счёт оребрения разделительной стенки со стороны дозвукового потока приводит к увеличению эффективности процесса: повышению коэффициента температурной эффективности и адиабатного КПД. В трубах Леонтьева вместе с развитием теплообменной поверхности разделительной стенки возникает дополнительная возможность повысить эффективность процесса энергоразделения за счёт уменьшения длины трубы, а значит за счёт снижения гидравлических потерь, в первую очередь, в сверхзвуковом канале.

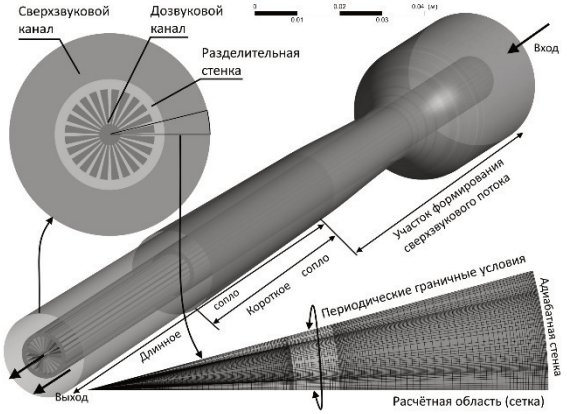


Рис. 1. Труба энергоразделения с оребрённой разделительной стенкой и различной длинной сопла (схема течения, геометрия расчетной области, граничные условия и пример расчетной сетки).

В данной работе представлены результаты численного моделирования энергоразделения в трубах Леонтьева с оребрённой разделительной стенкой и различной длиной сверхзвукового сопла. Схема трубы, геометрия расчетной области, граничные условия и пример расчетной сетки представлены на рис. 1. Конфигурация сверхзвукового сопла, геометрия разделительной стенки, за исключением оребрения и длины конического участка расширяющейся части сопла соответствуют трубе Леонтьева из работы [4]. Длина участка формирования сверхзвукового потока составляет 100 мм, короткое сопло имеет длину 75 мм, длинное – 150 мм. Максимальное число Маха в ядре сверхзвукового потока для обеих конфигураций составляет 2,71.

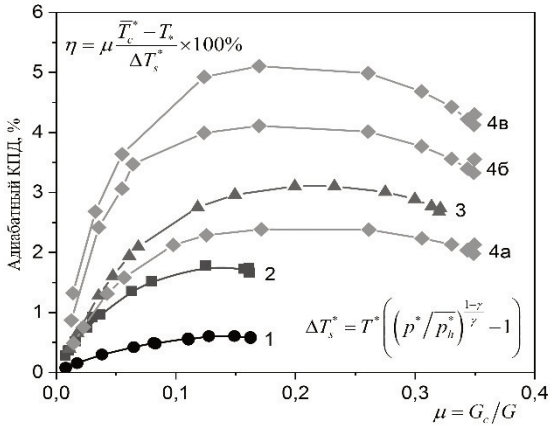


Рис. 2. Адиабатный КПД в зависимости от относительного расхода газа через дозвуковой канал: гладкая труба [4], p_{out} = 1 атм., воздух (1), гелий-ксенон (2); длинная оребрённая труба (η_2=7,4) [2], p_{out} = 1 атм., гелий-ксенон (3); короткая оребрённая труба (η_2=7,4), гелий-ксенон (4), p_{out} = 1 атм. (4а), 0,5 атм. (4б), 0,2 атм. (4в).

На рис. 2 представлены результаты численного моделирования адиабатного КПД. Показано, что адиабатный КПД энергоразделения в короткой трубе Леонтьева с оребрённой стенкой при понижении давления на выходе возрастает, в то время как для гладких труб адиабатный КПД не изменяется. Адиабатный КПД в максимуме достигает 5,1%.

Список литературы

1. Burtsev S.A., Leontiev A.I. Study of the influence of dissipative effects on the temperature stratification in gas flows (review) // High Temperature. – 2014. – V. 52(2). – p. 297–307.
2. Makarov M.S., Makarova S.N. Numerical simulation of energy separation of low-Prandtl gas mixture flowing in the finned single Leontiev tube // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V.1359. – P.012022.
3. Leontiev I.A., Zditovets A.G., Vinogradov Y.A., Strongin M.M., Kiselev N.A. Experimental investigation of the machine-free method of temperature separation of air flows based on the energy separation effect in a compressible boundary layer // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2017. – V. 88. – p. 202–219.
4. Zditovets A.G., Vinogradov Yu.A., Titov A.A. Experimental investigation of the heat transfer process at a gas-dynamic method of energy separation // Proc. of the IHTC15. – 2014. – IHTC15-8965.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН

УДК 536.2+532.555

ВЛИЯНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ СКОРОСТИ ПОТОКА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ЗА ВЫСТУПОМ В КАНАЛЕ

Михеев А.Н.[1], Михеев Н.И.[1], Давлетшин И.А.[1,2]

[1] Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ Казанский научный центр РАН
[2] Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ

e-mail: n.miheev@mail.ru

Отрывные течения широко распространены в природе и технике. Описание различных видов отрывного течения подробно представлено в монографии [1]. Часто отрыв потока создается умышленно, например, при помощи наложенных пульсаций скорости, с целью интенсификации тепло- и массообменных процессов [2].

Пульсирующие потоки характеризуются дополнительными параметрами – частотой и амплитудой, которые оказывают заметное влияние на процессы переноса массы, импульса и энергии в потоке. В этой связи выявление закономерностей влияния наложенных пульсаций на характеристики потока представляют большой научный и практический интерес.

Рабочий участок установки представлял собой канал 115 мм в высоту и 150 мм в ширину, выполненный из поликарбоната длиной 1,2 м с плавным входом (рис. 1). Алюминиевый выступ сечением 30х30 мм размещался на расстоянии 100 мм от входа в канал. Пульсации расхода потока воздуха создавались при помощи специального устройства – пульсатора.

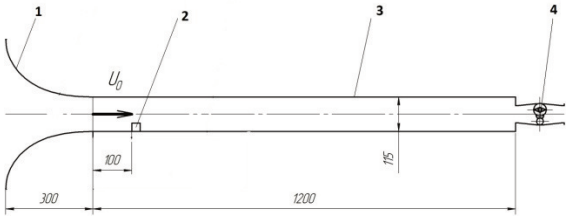


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – входное устройство; 2 – выступ; 3 – канал; 4 – пульсатор.

В исследовании были представлены результаты экспериментальных исследований кинематической структуры потока при отрывном обтекании выступа в гладком канале на стационарном и на пульсирующем режимах течения.

Так, в работе было показано, что в сечении x/e=2 при y/e~2.2 наблюдается область, где происходят резкие изменения V (рис. 2). Поперечная скорость здесь имеет противоположное предыдущему сечению направление, что является свидетельством наличия вихревого движение между ними. Скорость V скачкообразно меняется, почти достигая нулевого значения. Ниже по потоку при x/e=3 на высоте y/e~2.5 можно вести речь об аналогичных изменениях. Однако профиль поперечной скорости V здесь меняется уже не скачком, а претерпевает лишь перегиб. Таким образом, линия, проходящая через эти области, может быть представлена как определенная граница между двумя областями течения. На графиках она представлена пунктиром. Выше этой линии поток в основном можно считать невозмущенным безвихревым. А ниже линии поток возмущен выступом и за ним на пульсирующем режиме формируются, перемещаются и распадаются крупномасштабные вихревые структуры.

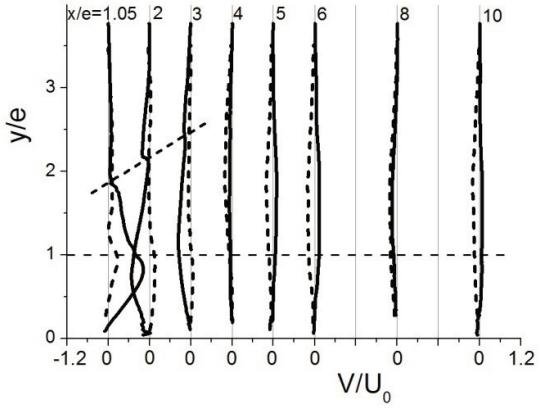


Рис. 2. Профили поперечной скорости в отрывной области.

На это же указывают и профили рейнольдсовых напряжений (рис. 3)

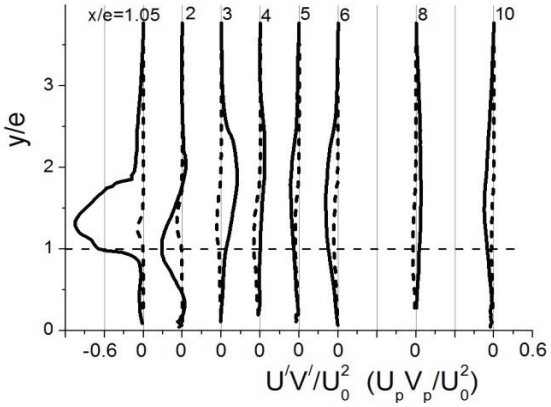


Рис.3. Профили рейнольдсовых напряжений в отрывной области.

Такая же четкая граница между безвихревой и вихревой областями наблюдалась при отрыве пульсирующего потока за входной кромкой канала [3].

Список литературы

1. Chang, P. K. Separation of flow. Elsevier. 2014.
2. Mikheev N.I., Molochnikov V.M., Mikheev A.N., Dushina O.A. Hydrodynamics and heat transfer of pulsating flow around a cylinder. International Journal of Heat and Mass Transfer.
3. Davletshin I. A. et al. Convective heat transfer in the channel entrance with a square leading edge under forced flow pulsations, International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. No. 129. P. 74–85.

Визуальные исследования выполнены при поддержке РНФ (грант № 20-61-47068); исследования характеристик турбулентности – гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (грант МК-2237.2020.8 Поиск новых способов снижения гидравлического сопротивления в каналах путем динамического воздействия на турбулентный поток).

УДК 536.2+532.555

СТРУКТУРА ПОТОКА И ТЕПЛООБМЕН В КАНАЛЕ С НИЗКОЙ ДИСКРЕТНОЙ ШЕРОХОВАТОСТЬЮ СТЕНКИ

Михеев Н.И., Душин Н.С., Шакиров Р.Р.

Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ Казанский научный центр РАН

e-mail: n.miheev@mail.ru

Одним из наиболее эффективных способов интенсификации теплоотдачи является нанесение на стенку элементов дискретной шероховатости в виде поперечных выступов. Высота элементов шероховатости должна быть не слишком велика по сравнению с толщиной вязкого подслоя. Рациональной для турбулентных потоков является высота поперечных выступов порядка 1-2% от гидравлического диаметра, которая при умеренно высоких числах Рейнольдса лишь в несколько раз больше толщины вязкого подслоя, т.е. гораздо ниже границы полного проявления шероховатости.

Получены и обобщены экспериментальны данные по теплообмену в канале с низкой дискретной шероховатостью стенки. На рис.1 представлен закон теплообмена в дискретно шероховатом канале с полуцилиндрическими выступами с относительной высотой h/Dг=0.015 и шагом t/h=19 в сравнении с теплообменом в том же канале с гладкой стенкой.

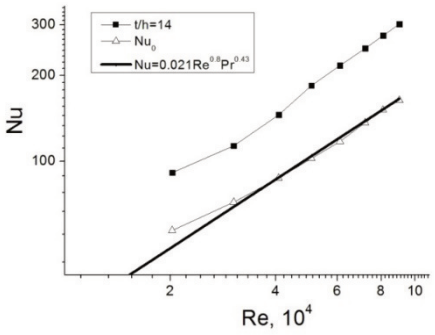


Рис. 1. Коэффициент теплоотдачи в дискретно-шероховатом канале с полуцилиндрическими выступами с относительной высотой h/Dг=0.015 и шагом t/h=14. Nu_0 – в том же канале с гладкой стенкой.

Методом SIV [1,2] выполнены измерения динамики векторных полей скорости потока при турбулентном течении в канале с дискретной шероховатостью стенки в виде поперечных выступов квадратного сечения для трех относительных высот h по отношению к гидравлическому диаметру D: h/D = 0.02, 0.055 и 0.1. Выполнена оценка интегрального масштаба турбулентности в пристеночной области дискретно шероховатого канала на основе измеренных пространственных корреляционных функций.

Установлено, что при обтекании дискретной шероховатости в виде низких полуцилиндрических выступов на высоте вершин выступа в потоке формируются интенсивные вихри с интегральным масштабом 2.5h, под влиянием которых многократно (до 5 раз) увеличивается энергия пульсаций продольной компоненты скорости потока по сравнению с гладким каналом в соответствующем интервале частот пульсаций. При числе Рейнольдса по гидравлическому диаметру канала Re=11 000 сравнительные спектры пульсаций продольной скорости потока на различных расстояниях от выступа показаны на рис. 2.

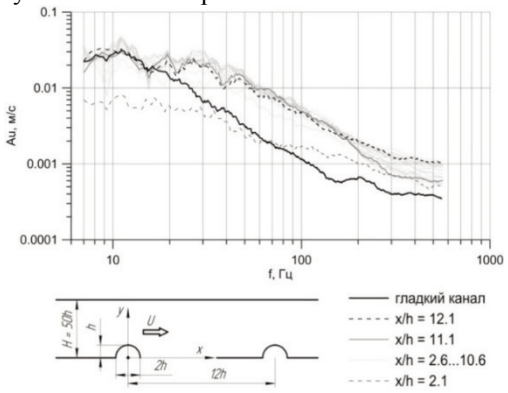


Рис. 2. Спектр пульсаций скорости потока на высоте вершин выступов.

Изменению структуры потока при обтекании низких выступов способствует сравнительно малое число Рейнольдса по локальным параметрам обтекания элемента шероховатости, которое на два-три порядка меньше числа Рейнольдса по диаметру канала и среднерасходной скорости. Кроме того, скорость потока, набегающего на низкое препятствие, в пределах его высоты изменяется почти линейно, тогда как при обтекании высоких препятствий она почти равномерна. Но основным фактором воздействия на структуру потока является внутренняя нестационарность обтекания низких выступов. Относительная частота следования вихрей, нормированная по шагу между выступами или длине отрывной области, имеет порядок 1. Интенсивность пульсаций в окрестности этой частоты составляет несколько процентов от скорости потока на высоте вершин выступа. Именно к достаточно интенсивным пульсациям скорости потока с относительной частотой порядка 1 весьма чувствительны гидродинамические и тепловые процессы в отрывной области [3].

Список литературы

1. Mikheev N.I., Dushin N.S. A method for measuring the dynamics of velocity vector fields in a turbulent flow using smoke image-visualization videos // Instruments Exp. Tech. 2016. Т. 59. № 6. С. 882–889.
2. Mikheev N. I., Goltsman A. E., Saushin I. I., Dushina O. A. Estimation of turbulent energy dissipation in the boundary layer using Smoke Image Velocimetry // Experiments in Fluids. 2017. No. 58(8). P. 97.
3. Давлетшин И.А., Михеев Н.И. Структура течения и теплообмен при отрыве пульсирующего потока // Теплофизика высоких температур. 2012. Т. 50. № 3. С. 442.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-19-00355) при частичном использовании результатов по теплообмену, полученных при поддержке РФФИ (проект 19-08-00421)

УДК 532.5

ФОРМИРОВАНИЕ СМЕРЧЕОБРАЗНЫХ ВИХРЕЙ ПРИ ОБТЕКАНИИ ЦИЛИНДРА В КАНАЛЕ ПРИ УМЕРЕННЫХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА

Молочников В.М.[1,2], Мазо А.Б.[3], Калинин Е.И.[3], Паерелий А.А.[1], Клюев М.А.[2]

[1] Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ Казанский научный центр РАН
[2] Казанский национальный исследовательский технический университет им.А.Н.Туполева – КАИ
[3] Казанский (Приволжский) федеральный университет

e-mail: vmolochnikov@mail.ru

Поперечно обтекаемый цилиндр является классическим объектом для изучения отрывных течений. Подавляющее большинство результатов эксперимента и численного моделирования этого типа течения выполнены для безграничного внешнего потока, в том числе и при расположении цилиндра вблизи плоской границы (стенки). В последнем случае основное внимание исследователей привлекают вопросы изменения частоты срыва вихрей, а также особенности вихревой структуры течения за цилиндром в зависимости от величины зазора между цилиндром и стенкой. Эти исследования выполняются в широком диапазоне чисел Рейнольдса, включая и режимы перехода к турбулентности в следе цилиндра. Однако практически отсутствует информация о закономерностях вихреобразования при обтекании цилиндра в канале, ограниченном боковыми стенками.

В настоящей работе представлены результаты эксперимента и DNS моделирования трехмерной вихревой структуры течения за поперечным цилиндром, расположенным в канале прямоугольного поперечного сечения высотой $H = 20$ мм и шириной $B = 50$ мм при $\mathrm{Re} = 60 – 300$, вычисленном по диаметру цилиндра $d = 3$ мм (рис.1). Рассматривалось два значения величины зазора δ между цилиндром и стенкой канала: $\delta = 0{,}075\,H$ и $0{,}5H$.

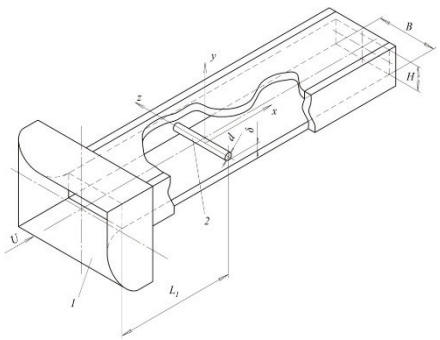


Рис.1. Схема рабочего участка установки.

Эксперименты включали визуализацию потока и SIV измерения мгновенных векторных полей скорости. При DNS моделировании решались трехмерные нестационарные уравнения Навье-Стокса в естественных переменных с использованием пакета ANSYS Fluent 14.5.

Во всем диапазоне чисел Рейнольдса за цилиндром обнаружено формирование смерчеобразного спиралевидного движения жидкости от боковых стенок канала к его центру. Аналогичные процессы были ранее выявлены авторами при обтекании полуцилиндрического препятствия, расположенного настенке канала без зазора [1]. Под влиянием смерчеобразного движения крупномасштабные вихревые структуры (вихри Кармана) за цилиндром, которые при $\delta = 0{,}075\,H$ начинают формироваться, начиная с $\mathrm{Re} \approx 160$, а при $\delta = 0{,}5H$ – с $\mathrm{Re} \approx 90$, хорошо видны как на данных DNS моделирования, так и на результатах визуализации (рис.2).

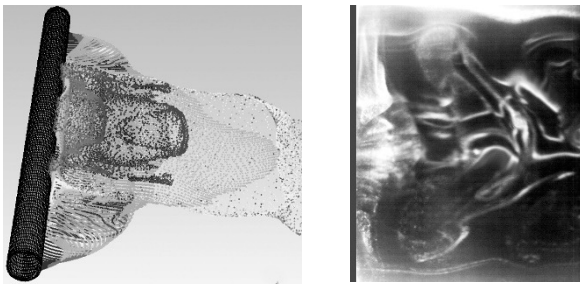


Рис. 2. Формирование вихрей Кармана при Re = 160 и δ = 0,075 H по результатам DNS (слева) и при Re = 90 и δ = 0,5 H, эксперимент (справа).

Установлено, что движение жидкости в поперечном направлении к центру канала и смерчеобразное вихревое движение связано с образованием зон пониженного давления вблизи боковых стенок канала (рис.3), формирующихся при взаимодействии пограничных слоев на этих стенках с рециркуляционной областью за цилиндром.

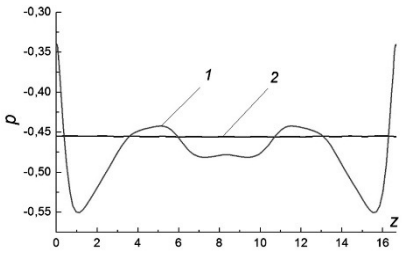


Рис.3. Распределение давления за цилиндром: 1 – с учетом пограничных слоев на боковых стенках канала; 2 – при периодических граничных условиях на этих стенках.

Список литературы

1. Molochnikov V.M., Mazo A.B., Kalinin E.I., Malyukov A.V., Okhotnikov D.I. and Dushina O.A. Formation and turbulent breakdown of large-scale vortical structures be-hind an obstacle in a channel at moderate Reynolds numbers // Physics of Fluids. 2019. No. 31 (104104). P. 1–10.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-41-160022 (эксперимент) и РНФ20-61-47068 (численное моделирование)

УДК 536-34

ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЕ В ВИХРЕВОЙ ТРУБЕ ПРИ ЛАМИНАРНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ

Наумкин В.С., Терехов В.И.

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

e-mail: vsnaumkin@itp.nsc.ru

Процесс энергоразделения в вихревой трубе Ранка-Хилша известен довольно давно и его исследованию посвящено большое количество работ. Однако механизм вихревого энергоразделения до сих пор не выяснен и в настоящее время на этот счёт существует множество гипотез. Эффективное вихревое энергоразделение наблюдается при высоких скоростях потока, поэтому подавляющее число работ посвящено изучению турбулентного режима течения. Однако есть ряд работ, посвященных работе вихревой трубы при ламинарном режиме.

В [1] рассматривалось энергоразделение в закрученном потоке в ламинарной постановке. Было показано, что нет необходимости в привлечении дополнительных гипотез для описания процесса энергоразделения. В [2] рассматривалось ламинарное течение внутри вихревой трубы без учёта диссипации, и сказано, что для учёта вязкостного нагрева и энергоразделения необходимо использовать какую-либо модель турбулентности. Полученная модель способна объяснить распределение температуры внутри вихревой трубы.

В литературе нет однозначного ответа о необходимости применения дополнительных гипотез, описывающих поведение турбулентных закрученных потоков, для описания энергоразделения. Поэтому моделирование газодинамического энергоразделения в вихревой трубе при ламинарном режиме работы является актуальной задачей.

В работе [3] было выполнено комплексное исследование эффекта энергоразделения в круглой трубе. Показано, что практически значимое энергоразделение может иметь место и при ламинарном режиме течения. Авторы [3] сформулировали условия эффективного энергоразделения в вихревом устройстве: а) высокое число Маха на входе, обеспечивающее разгон газа в потенциальном вихре до околозвуковых скоростей; б) интенсивная закрутка потока, обеспечивающая преобладание окружного движения над расходным и, соответственно, значительное увеличение числа Маха при разгоне газа в потенциальном вихре; в) почти полное отсутствие конвективного теплообмена между вихревым ядром и областью свободного вихря.

Целью данной работы было численное моделирование процесса газодинамического энергоразделения внутри вихревой трубы Ранка-Хилша при ламинарном режиме течения. Геометрия рассматриваемой вихревой трубы и условия на границах расчётной области были взяты из работы [3]. Получено качественное совпадение с экспериментальными данными.

На рис. 1 представлена схема течения и размеры исследуемой вихревой трубы. Визуализация поля полной температуры и векторного поля скорости

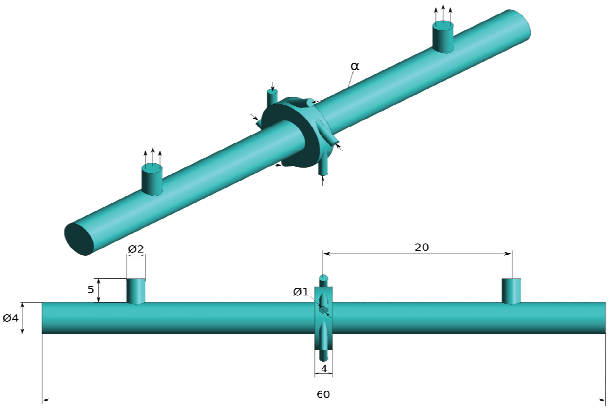


Рис. 1. Размеры вихревой трубы

представлены на рис. 2. Давление на входе составляло 7 атм. Максимальная разница полных температур составила в данном случае 20 К.

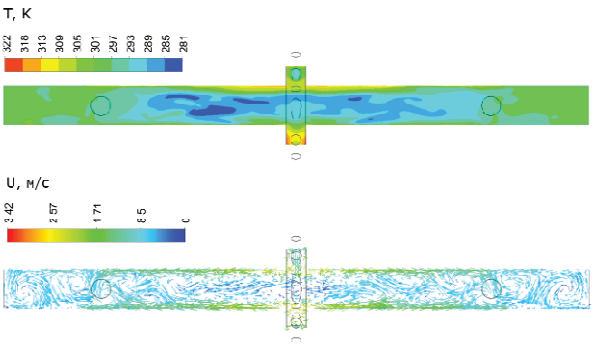


Рис. 2. Поле полной температуры и векторное поле скорости внутри вихревой при давлении на входе P_0=7 атм.

Список литературы

1. Tarunin E.L., Alikina O. N. Calculation of heat transfer in Ranque-Hilsch vortex tube // International Journal for Numerical Methods in Fluids. 2005. No. 48. P. 107–113.
2. Shtern V.N., Borissov A.A. Nature of counterflow and circulation in vortex separators // Physics of Fluids. 2010. V.22. No. 083601.
3. Baranov V.A. et al. Ranque's Effect in a Laminar Flow // Russian J. Engineering Thermophysics. 1996. No. 4(6). P. 291–306.

Работа поддержана РНФ (грант № 18-19-00161)

УДК 532.54

УПРАВЛЕНИЕ РАСПАДОМ ВИХРЯ В ОГРАНИЧЕННЫХ ДВУХЖИДКОСТНЫХ ТЕЧЕНИЯХ

Наумов И.В. [1,2], Шарифуллин Б.Р. [1,2], Штерн В.Н. [1]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
[2] Новосибирский государственный университет

e-mail: naumov@itp.nsc.ru

Моделирование режимов работы вихревых реакторов необходимо для исследования интенсификации тепло- и масоосепереноса и оптимизации рабочих ре жимов. Особое внимание при исследовании ограниченных вихревых течений уделяется изучению распада вихря из-за важных приложений в химических, биологических и энергетических технологиях [1].

Сравнительно недавно внимание исследователей привлекли двух-жидкостные вращающиеся течения в связи с развитием вихревых аэрированных биореакторов. Кислород из воздуха (верхняя среда) диффундирует через поверхность раздела в нижнюю жидкость (воду), циркуляция которой доставляет кислород к биологической культуре, обеспечивая её быстрый рост. Удобной моделью биореактора является вертикальный цилиндрический контейнер, где движение заполняющей жидкости генерируется вращением одного из торцевых дисков [2-4]. Течения в нём оказались богаты парадоксальными свойствами, которые представляют не только практический, но и фундаментальный интерес.

Экспериментальное исследование [2] ячеистой структуры в двухжидкостном течении обнаружило эффект проскальзывания: (а) скачок азимутальной скорости из-за разности плотностей и (б) скачок радиальной скорости, происходящий при близких плотностях нижней и верхней жидкостей. Но наиболее важным из свойств вихревого движения является распад вихря, который был обнаружен и в верхней [3] и в нижней [4] жидкостях.

В данной работе показано, что с усилением вращения, регулируя высоту верхней жидкости и отношение вязкостей, можно управлять режимами, при которых формируется осевой распад вихря в нижней жидкости. Наблюдения проведены, используя контейнер радиуса R=45 мм и высотой h = 2,5R, чей верхний диск вращается с угловой скоростью ω (рис. 1а). Контейнер заполнен подсолнечным маслом, как менее плотная жидкость (h_o=0,1–1,0R, кинематическая вязкость ρ_o=914,7кг/м^3, плотность ν_o=54,86 мм^2/с), а в качестве нижней жидкости использовалась дистиллированная вода (h_w=1,5R, ρ_w=1000 кг/м^3 и ν_w=1,0 мм^2/с) при комнатной температуре 22,6°C.

Скорость вращения определяется необходимым числом Рейнольдса, $Re = \omega R^2/\nu_o$. Для изучения структуры потока были использованы оптические методы бесконтакт- ной диагностики, такие как визуализация и Particle Image Velocimetry (PIV).

Установлено что использование контактных сред с разной плотностью и вязкостью оказывает влияние на эволюцию циркуляции в нижней жидкости, когда при существенных различиях в вязкостях используемых жидкостей необходима добавка энергии на преодоление проскальзывания на границе двух жидкостей. При этом Re, основанное на максимальной азимутальной скорости на данной высоте, непрерывно убывает в каждой жидкости с увеличением расстояния от вращающегося диска, но имеет скачки на поверхностях раздела, изменяясь в *N* раз, где *N* это отношение (верхней к нижней) вязкостей. Рис. 1в показывает один из результатов настоящей работы. Схожая картина наблюдается при других слоях верхней жидкости и различных числах Рейнольдса.

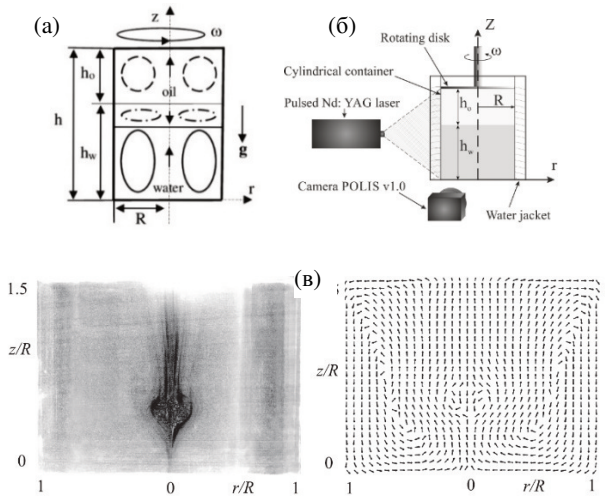


Рис. 1. (а) Структура течения и (б) схема установки, (в) пример распада вихря в нижней жидкости фото (слева) и структура течения (справа) при h_o=1.0R и Re=300 или при h_o=0.5R и Re=100.

В результате проведенных исследований установлено, что развитие ячейки циркуляции под границей раздела – пузыревидного распада вихря в системе двух несмешиваемых жидкостей – происходит так же, как и в случае одной жидкости. Данные результаты представляют интерес для развития вихревых технологий, где формирования вихревого движения рабочей жидкости происходит без прямого механического контакта с закручивающим устройством – "*жидкая крышка*"– с целью обеспечения более мягкого и эффективного перемешивания.

Список литературы

1. Shtern V. Cellular Flows/ Cambridge: Cambridge University Press. 2018. 573 p.
2. Naumov I.V., Sharifullin B.R., Kravtsova A. Yu., Shtern V.N. Velocity jumps and the Moffatt eddy in two-fluid swirling flows // Experimental Thermal and Fluid Science. 2020. V. 116. 110116.
3. Carrion L., Naumov I.V., Sharifullin B.R., Herrada M.A., Shtern V.N. Mechanism of disappearance of vortex breakdown in a confined flow // J. Eng. Thermopysics. 2020. V. 29. P. 49–66.
4. Naumov I.V., Sharifullin B., Shtern V.N. Vortex breakdown in the lower fluid of two-fluid swirling flow // Phys. Fluids. 2020. V. 32. 014101.

Работа поддержана РНФ (грант № 19-19-00083) и РФФИ (грант № 18-08-00508) в части развития методики измерения

УДК 621.9

АКТИВНЫЕ ТЕПЛОПЕРЕНОС И УПРАВЛЕНИЕ ПОТОКОМ ВОКРУГ ЦИЛИНДРА ВРАЩАТЕЛЬНЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ

Палкин Е.В.[1], Мулляджанов Р.И.[1,2], Хадзиабдич М.[3], Ханъялич К.[4]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
[2] Новосибирский государственный университет
[3] Международный университет Сараево, Сараево
[4] Технологический университет Делфта, Делфт

e-mail: palkinev89@gmail.com

В статье представлен краткий обзор недавних вычислительных исследований управления потоком и теплопереносом вращательными осцилляциями бесконечного круглого цилиндра при относительно широком наборе вынужденных частот и амплитуд [1, 2]. Исследование для ранее недоступного высокого докритического числа Рейнольдса $Re = 1.4 \times 10^5$ показало, что эффективность этого метода управления возрастает с увеличением Re в отношении снижения коэффициентов лобового сопротивления и пульсаций подъемной силы. Высокие частоты осцилляций ведут к снижению лобового сопротивления вплоть до 90%. Однако преимущества для теплопереноса не настолько очевидные, так как среднее число Нуссельта Nu показывает относительно малые изменения (до 10%). В то же время его угловое распределение вокруг цилиндра становится более однородным из-за осцилляций, что практически может привести к предотвращению локальных перегревов.

На поверхности цилиндра диаметра D задавались постоянный тепловой поток и тангенциальная скорость $U_w = \Omega \sin(2\pi f t)$, нормированная на скорость натекающего однородного потока воздуха (число Прандтля $Pr = 0.71$), где Ω и t — безразмерные амплитуда вращения и время, соответственно, а f — частота вращения, деленная на частоту естественного срыва вихрей без управления.

На рис. 1 показаны изменения вихревой структуры потока, вызванные вращательными колебаниями. Поток вокруг невращающегося цилиндра имеет выраженные трехмерные когерентные вихревые структуры и относительно широкий след, в то время как вращение подавляет развитие крупномасштабных структур и вынужденно производит срыв вихрей с кромок цилиндра, оставляя вихри преимущественно двухмерными.

Распределение среднего по времени числа Нуссельта $Nu\ (\varphi)$ показано на рис. 2. Для невращающегося потока $Nu\ (\varphi)$ выше в донной точке, что типично для высоких Re. Значение в лобовой точке — результат тонкого ламинарного пограничного слоя, который растет при движении вокруг цилиндра вплоть до точки отрыва потока. Значение в донной точке определяется турбулентными вихревыми структурами, срывающимися с кромок цилиндра.

В полнотекстном докладе будет представлен емкий обзор данного метода управления для различных Re.

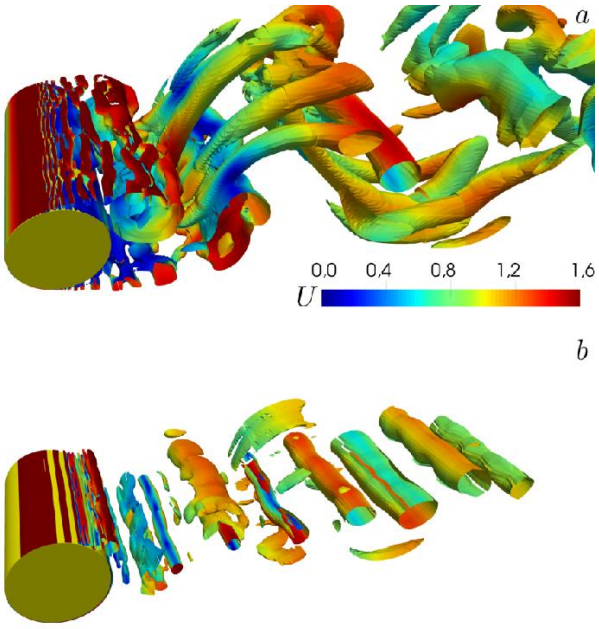


Рис. 1. Изоповерхность Q = 0.5 для (a) невращающегося случая и (b) f = 2.5, Ω = 2. Цветом показано мгновенное поле продольной скорости.

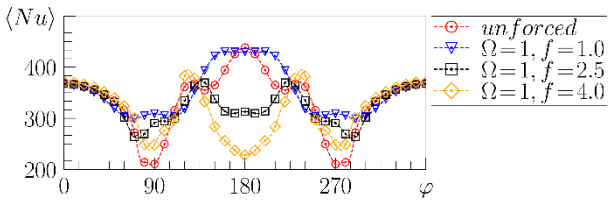


Рис. 2. Угловое распределение время-осредненного числа Нуссельта Nu(φ) для все рассмотренных случаев.

Список литературы

1. ., ., ., . Control of flow around a cylinder by rotary oscillations at a high subcritical Reynolds number // J. Fluid Mech. 2018. V. 855. P. 236–266.
2. ., ., ., . Heat transfer in flow around a rotary oscillating cylinder at a high subcritical Reynolds number: a computational study. // Int. J. Heat and Fluid Flow 2019. V. 79. P. 108441.

Работа поддержана РФФИ грантами № 18-38-00943, 19-48-543020, разработка вычислительного кода выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

УДК 551.465.48

ВЛИЯНИЕ ПОТОКОВ ТЕПЛА НА ФОРМИРОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ХАЛИННОЙ СТРАТИФИКАЦИИ В ЧЕРНОМ МОРЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Сендеров М.В.

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь

e-mail: senderovmaxim@gmail.com

Изучая водообмен через пролив Босфор и процесс формирования вертикальной халинной стратификации Черного моря, ранее уже был выполнен ряд работ [1 – 4]. Их основная идея – долгосрочное численное моделирование термохалинных полей в бассейнах Азовского, Черного и Мраморного морей с различными начальными и граничными условиями. Все эксперименты выполнялись с помощью модельного комплекса NEMO [5]. Подробное описание разработанной для этих задач конфигурации изложено в [1].

Данная работа демонстрирует влияние граничных условий на поверхности на водообмен через пролив Босфор и на формирование вертикальной халинной стратификации Черного моря. Для этого было проведено два численных эксперимента продолжительностью 65 модельных лет. За основу был выбран численный эксперимент из работы [1] со значением однородной по пространству солености равным 12 ‰ (эксперимент 1). Для задания потоков тепла использовались данные, полученные в отделе ВАО ФГБУН ФИЦ МГИ. В модельном комплексе NEMO предусмотрено несколько способов задания граничных условий (г/у) на поверхности. Так, для второго эксперимента была выбрана потоковая формулировка. При этом задавались следующие поля г/у на поверхности: тангенциальное напряжение трения ветра в зональном и меридиональном направлениях (ветровое воздействие не учитывалось, эти поля равнялись нулю), суммарный поток радиации, суммарный поток коротковолновой радиации, испарение минус осадки. Поля атмосферного воздействия для третьего эксперимента получены посредством использования балк-формулы протокола CORE. Они используют инерционный метод рассеивания для расчета коэффициентов турбулентного переноса (импульса, ощутимого тепла и испарения) из скорости ветра 10 метров, температуры воздуха и удельной влажности [5]. В этом эксперименте задавались следующие поля г/у на поверхности: скорость ветра на высоте 10 м в зональном и меридиональном направлениях, температура и влажность на высоте 2 м, суммарные осадки (жидкие плюс твердые), твердые осадки, потоки коротковолновой нисходящей радиации, поток длинноволновой нисходящей радиации.

Анализируя полученные результаты, видно, что осолонение в расчетах с учетом потоков тепла происходит медленнее, чем в первом эксперименте (см. рис. 1). За 65 модельных лет значение солености на глубине во втором расчете достигает 13 ‰, а в третьем 13,5 ‰. Однако в этих расчетах появляется верхний квазиоднородный слой (см. рис. 1). Во всех экспериментах глубина залегания галоклина находится на глубине 20 метров (см. рис. 1).

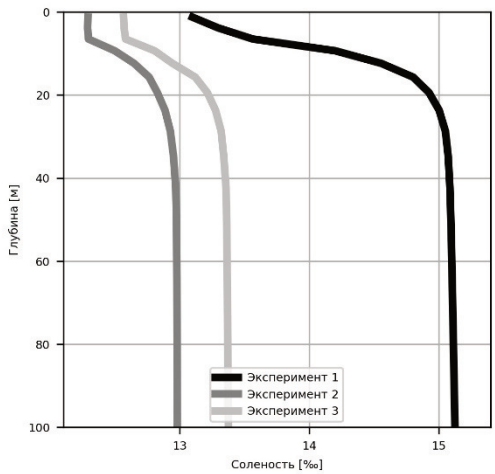


Рис. 1. Средние по бассейну Черного моря профили солености через 65 модельных лет.

Учет атмосферного воздействия в экспериментах 2 и 3 повлиял на расходы верхнебосфорского и нижнибосфорского течений. Их значения примерно в два раза меньше, чем в первом эксперименте. Однако отношение верхнебосфорского течения к нижнебосфорскому во всех трех экспериментах приблизительно равно 1,5.

Полученное соотношение врхнебосфорского течения к нижнебосфорскому совпадает с результатами предыдущих работ. Вертикальная халинная стратификация в проведенных двух экспериментах качественно более близка к нынешней, чем стратификаци в первом эксперименте.

Список литературы

1. Сендеров М.В., Мизюк А.И. Влияние начальных условий на водообмен через Босфор и формирование вертикальной халинной структуры черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. Севастополь. 2017. Вып. 2. С. 82–89.
2. Senderov M.V., Mizyuk A.I., Korotaev G.K. The Bosphorus exchange flow impact on the river runoff // Journal of Physics: Conference Series. 2018. V. 1128. (1). 012149 p.
3. Senderov M.V., Mizyuk A.I., Korotaev G.K. Study of the formation of the Black Sea haline stratification from the numerical simulations // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1359 (1). 012076 p.
4. Мизюк А.И., Сендеров М.В., Коротаев Г.К Основные закономерности долговременной эволюции халинной стратификации Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35. No. 6. С. 646–661.
5. 4. Madec G. NEMO ocean engine // Note du pôle de modélisation, IPSL. France No. 27. ISSN N. 2012. P. 1288–1619.

Работа поддержана РНФ (грант № 17-77-30001)

УДК 532.5

ТРАССЕРНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РАСПАДА ВИХРЯ В ПРОТОЧНЫХ И ОГРАНИЧЕННЫХ ТЕЧЕНИЯХ

Скрипкин С.Г., Цой М.А., Наумов И.В.

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

e-mail: skripkin.s.g@gmail.com

Интерес к явлению распада вихря связан со значительным количеством технических приложений, в которых используются закрученные потоки, где данное явление может наблюдаться. С фундаментальной точки зрения распад вихря также представляет интерес, имея большое количество проявлений и форм, аналитическое описание которых способствует развитию единого подхода при анализе вихревых структур [1,2].

Несмотря на то, что к единому определению понятия распада вихря в научном сообществе так и не пришли, большинство описывают это явление как структурное изменение вихревого ядра, связанное с замедление скорости на оси вихря вплоть до развития зоны рециркуляции. Два основных вида распада вихря – пузыревидный и спиральный, наблюдаются как в замкнутых, так и в проточных системах при различных числах Re. Наиболее подробную информацию о структуре и возможных причинах распада вихря можно найти в классических обзорных работах [3,4].

Значительный вклад в понимание сложной структуры трехмерного потока с распадом вихря внесла визуализация течения, так как именно качественное представление структуры потока позволяет в первом приближении выявить общие закономерности и особенности при варьировании режимных параметров.

Данное исследование направлено на развитие методов цифровой визуализации потоков и сфокусировано на выявлении общих закономерностей между замкнутыми и проточными система, что также является продолжением работы Джонс и др. [5] и предоставляет экспериментальное подтверждение диаграммы о границах режимов формирования пузыревидного и спирального распада вихря при попытке унифицировать течения в проточных и замкнутых системах.

Экспериментальный стенд представляет собой замкнутый гидродинамический контур с рабочим участком в форме конической прозрачной трубы. На входе рабочего участка установлен лопаточный вращающейся завихритель, частота вращения которого регулируется посредством внешней ременной передачи и асинхронного двигателя. Варьируя такие параметры как расход и частоту вращения можно получать различные режимы течения. Спиральный распад вихря в диффузоре реализуется гораздо проще из-за замедления потока, связанное с увеличением площади поперечного сечения вдоль конуса, которое как было показано [6] дестабилизирует вихревое течение делая спиральную моду доминирующей. Тем не менее при малых числах Re (~2000) медленно увеличивая закрутку потока удалось достичь режимов, в которых наблюдается стационарный или квазистационарный пузыревидный распад вихря (см. рис. 1).

В данной работе были изучены режимы формирования пузыревидного и спирального распада вихря при низких числах Re в проточном коническом рабочем участке. В работе использовался новый метод визуализации, позволяющий в реальном времени применять осреднение с плавающим окном по буферу изображений за вычетом изначально рассчитанного среднего значения интенсивности. Это позволяет получить длинные треки частиц при достаточно высокой контрастности и низком уровне шума. Визуализация течения сопровождалась измерением профилей скорости с использованием ЛДА техники для определения основных параметров течения таких как Re' и S' введённых в [5] как $Re' = (u_{max}R_c)/\nu$, $S' = \omega_{max}/u_{max}$, где u_{max}, максимальная осевая скорость, ω_{max} максимальная тангенциальная скорость на высоте u_{max}, R_c – радиус вихревого ядра, радиальная координата ω_{max}.

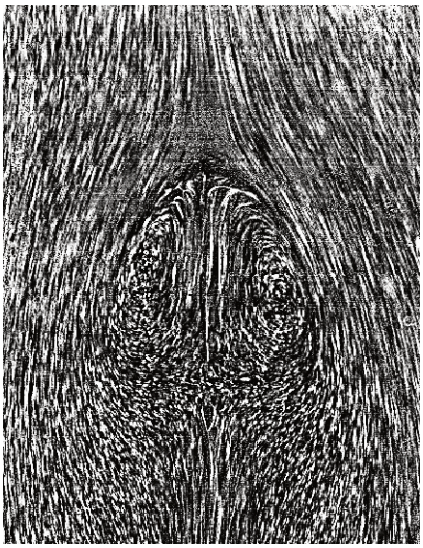


Рис. 1. Визуализаций пузыревидного распада вихря, $S' = 1.12$, $Re' = 49$.

Список литературы

1. Shtern V. Cellular Flows. Cambridge University Press. 2018.
2. Алексеенко С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. 2003.
3. Lucca-Negro O., O'Doherty T. Vortex breakdown: A review, Prog. Energy Combust. Sci. 2001. No. 27. P. 431–481.
4. Hall M.G. Vortex Breakdown, Annu. Rev. Fluid Mech. 1972. No. 4. P. 195–218.
5. Jones M.C., Hourigan K., Thompson M.C. A study of the geometry and parameter dependence of vortex breakdown, Phys. Fluids. 2015. No. 27. P. 044102.
6. Gau C., Huang T.M., Aung W. Flow and Mixed Convection Heat Transfer in a Divergent Heated Vertical Channel, J. Heat Transfer. 1996. No. 118. P. 606–615.

Работа поддержана РНФ (грант № 19-19-00083) и РФФИ (грант № 18-08-00508) в части развития методики измерения

УДК 536.24

RANS И LES МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАССИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОТРЫВНЫМ ПОТОКОМ ЗА ВНЕЗАПНЫМ РАСШИРЕНИЕМ КАНАЛА

Терехов В.В.[1,2], Барсуков А.В.[1], Терехов В.И.[2]

[1] Новосибирский государственный университет
[2] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

e-mail: vt@itp.nsc.ru

Для управления параметрами отрывного потока, такими как интенсивность циркуляционного течения и размеры области рециркуляции, используются различные методы, которые условно можно разделить на активные и пассивные. К активным методам можно отнести вдув или отсос пограничного слоя [1], различные периодические возмущения, вносимые в основной поток [2], периодический вдув струй и др. Данные методы позволяют плавно регулировать параметры отрывного потока и интенсивность теплообмена.

Но особый интерес представляют пассивные методы управления вследствие их более простой реализации. Наличие дополнительных элементов (поперечных ребер, зубцов, генераторов вихрей различной формы и др.), имеющих существенно меньшие размеры по сравнению с размерами основного отрывного потока, может приводить к значительной перестройке течения. Так, авторами [2,3], было показано, что использование поперечных ребер перед обратным уступом приводит к сокращению зоны рециркуляции на 50% по сравнению с каналом без ребра. В работе [4] показано, что использование генераторов продольных вихрей (табов) оказывают существенное влияние на теплообмен вблизи обратного уступа и сокращает координату максимального значения числа Нуссельта.

Для численного моделирования данной задачи был использован пакет OpenFOAM. Замыкание осредненных уравнений Навье-Стокса в подходе RANS производилось с помощью k-omega SST модели, поскольку она является наиболее универсальной при расчетах отрывных течений. Для RANS моделирования использовалась двумерная неравномерная сетка, сгущенная к стенкам канала, для удовлетворения условия $y^+ \leq 1$. Количество ячеек в сетке составило ~40000. На входе в расчетную область задавались условия, соответствующие полностью развитому течению в канале.

В расчетах с методом крупных вихрей (LES) для замыкания была использована модель Смагоринского. Пространственная дискретизация имела второй порядок точности (центральная разность). Шаг по время был выбран таким, чтобы во все поле расчета критерий Куранта не превышал 0.5, количество ячеек в вычислительной сетке составило 2.6 млн. Для задания входных условий был произведен дополнительный расчет полностью развитого течения в канале. В трансверсальном направлении были использованы периодические граничные условия.

Методами RANS и LES изучено отрывное течение в плоском канале с обратным уступом при наличии и отсутствии поперечного ребра для числа Рейнольдса Re = 5000. На рисунке 1 представлено положение максимума теплоотдачи в сравнении с экспериментом. Установлено, что наличие ребра приводит к увеличению интенсивности теплообмена на ~11% при оптимальном положении ребра (S = 1.55H). При этом расчетные данные качественно согласуются с экспериментом. Количественное совпадение имеет место в релаксационной области течения.

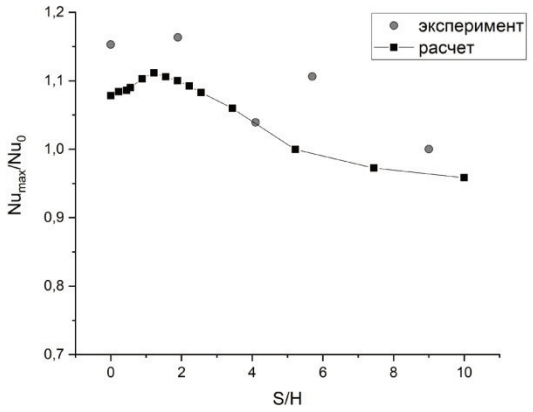


Рис. 1. Положение максимума теплоотдачи в сравнении с экспериментом:Nu_0 – число Нуссельта в плоском канале с обратным уступом без ребра, Nu_{max} – число Нуссельта при наличии ребра, эксперимент [5].

Список литературы

1. Terekhov V.V., Terekhov V.I. Effect of surface permeability on the structure of a separated turbulent flow and heat transfer behind a backward-facing step // J. Applied Mechanics and Tech. Physics. 2017. V. 58. № 2. P. 254–263.
2. Miau J. J., Lee K. C., Chen M. H., Chou J. H. Control of separated flow by a two-dimensional oscillating fence // AIAA J. 1991. V. 29. P. 1140–1148.
3. Neumann J., Wengle H. DNS and LES of Passively Controlled Backward-Facing Step Flow // Flow, Turbulence, Combust. 2003. V. 71. P. 297–310.
4. Dyachenko A.Yu., Zhdanov V.L., Smulskii Ya.I., Terekhov V.I. Experimental investigation of heat transfer in the separation zone behind a backward-facing step in the presence of tabs // Thermophysics and Aeromechanics. 2019. V. 26. №4. P. 509–518.
5. Terekhov V. I., Smul'skii I. Ya. Experimental study of heat transfer due to interaction of two separated flows of different scales // J. Applied Mechanics and Technical Physics. 2015. V. 56. № 5. P. 870–877.

Работа поддержана РНФ (грант № 18-19-00161)

УДК 536.24

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ СТРУЙ

Терехов В.В., Чохар И.А., Филиппов М.В.

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

e-mail: vt@itp.nsc.ru

Неослабевающий интерес к турбулентным струйным течениям обусловлен, с одной стороны, фундаментальными аспектами проблемы описания турбулентных течений, с другой стороны, широчайшим спектром приложений. Понимание всех аспектов взаимодействия двух и более параллельных струй является важным для создания эффективных систем охлаждения, аппаратов химической технологии, энергоустановок. В работах авторов [1-2] были рассмотрены особенности взаимодействия для парных круглых струй. В тоже время, одиночная струя, истекающая из кольцевого сопла весьма существенно отличается от «классической» круглой [3-5], особенно в ближней к соплу области. Взаимодействие же между двумя и более кольцевыми струями изучено достаточно слабо.

В настоящем докладе представлены результаты экспериментального и численного исследования структуры течения в системе из двух параллельных струй, истекающих из одинаковых кольцевых сопел, при числе Рейнольдса 5500. Геометрия сопла была фиксирована с отношением внутреннего и внешнего радиусов 0.72, при этом варьируемым параметром было расстояние между осями струй, что в некотором смысле и определяло «степень» взаимодействия.

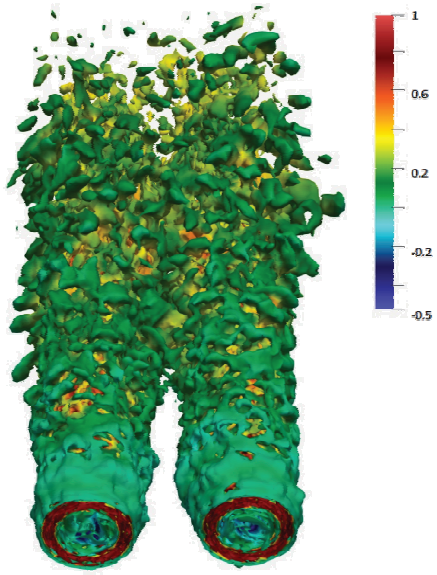


Рис. 1. Мгновенная изоповерхность Q-критерия (Q = −200) окрашенная согласно распределению осевой компоненты вектора скорости. Расстояние между осями струй 1.8D.

Экспериментальное исследование было проведено с использованием двухкомпонентного лазерного допплеровского анемометра [1]. Численное моделирование методом крупных вихрей было выполнено в условиях максимально близких к эксперименту (рис. 1, 2).

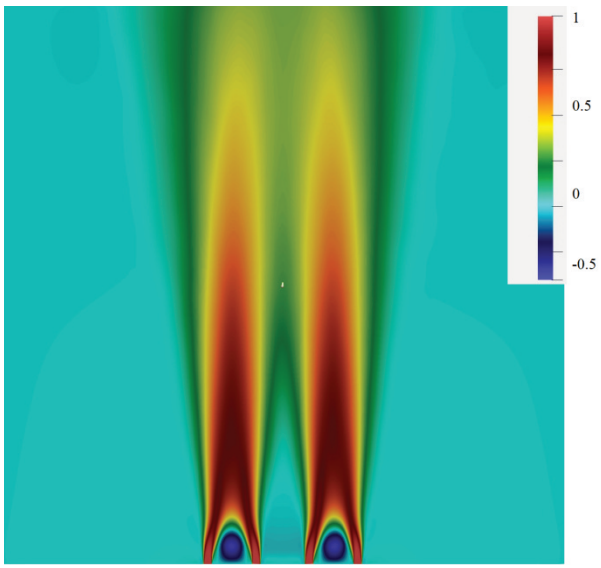


Рис. 2. Распределение средней осевой скорости в системе двух кольцевых струй. Расстояние между осями струй 1.8D.

Результаты измерений и данные численного моделирования, детально изложенные в полном докладе, находятся в хорошем количественном согласии. Также в полном докладе представлен анализ средних и пульсационных характеристик течения, проведено сравнение поведения одиночной кольцевой струи и одной из пары струй, показаны особенности развития течения в системе парных кольцевых струй с ранее исследованной парой круглых струй.

Список литературы

1. Barsukov A.V., Filippov M.V., Chokhar I.A. and Terekhov V.V. Large eddy simulation of two parallel round jets // IOP Conf. Series: J. Phys.: Conf. Series. 2019. V. 1359. P. 012020.
2. Filippov M.V.,Chokhar I.A. and Terekhov V.V. Experimental study of interaction of two parallel circular jets // IOP Conf. Series: J. Phys.: Conf. Series. 2019. V. 1359. P. 012019.
3. Chigier N.A., Beer J.M. The flow region near the nozzle in double concentric jets// J. Basic Eng. 1964. Dec. P. 797–804.
4. Ko N.W.M. and Chan W.T. The inner regions of annular jets// J. Fluid Mech. 1979. V. 93. P. 549–584.
5. Del Taglia C. et al. Numerical and experimental investigation of an annular jet flow with large blockage // J. Fluid Eng. 2004. V. 126. P. 375–384.

Работа поддержана РФФИ (грант № 18-08-00986)

УДК 533.6.013.122, 519.85

УПРАВЛЕНИЕ ПОТОКОМ ЗА ЦИЛИНДРОМ С ВРАЩАТЕЛЬНЫМИ ОСЦИЛЛЯЦИЯМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Токарев М.П.[1,2], Палкин Е.В.[1], Мулляджанов Р.И.[1,2]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
[2] Новосибирский государственный университет

e-mail: mtokarev@itp.nsc.ru

В данной работе мы экспериментируем с современными подходами машинного обучения для решения задачи оптимизации о снижении аэродинамического сопротивления при обтекании цилиндра для Re=100. Для управления угловой скоростью цилиндра был применен алгоритм обучения с подкреплением, синтезирующий регулятор на основе нейронной сети. Полученные преимущества в плане снижения лобового сопротивления достигали до 7% по сравнению со случаем без управления. Методы повышения скорости сходимости к оптимальной политике управления потоком необходимо исследовать дополнительно, поскольку они непосредственно влияют на вычислительную сложность оптимизации.

Классический поток за цилиндром представляет собой идеальный тестовый случай для валидации численного моделирования и новых методов управления [1]. Благодаря прогрессу в технологиях, управляемых данными, для приложений управления [2] стало возможным отображать сложную нелинейную динамику с использованием подходов без модели и разрабатывать соответствующие регуляторы для различных целевых функций, таких как управление подъемной силой или оптимизация аэродинамического сопротивления. Недавно был представлен пример первого успешного применения алгоритма глубокого обучения с подкреплением (DRL) для оптимизации аэродинамического сопротивления 2D течения за цилиндром при Re = 100 [3]. Воздействие на поток осуществлялось с использованием двух боковых струй, направленных нормально к стенке цилиндра.

В нашей работе для управления потоком мы используем вращение цилиндра и расчетный код T-Flows [4]. Размер используемой вычислительной области $L_x \times L_y = 30D \times 20D$ (15140 ячеек) с равномерным профилем на входе, периодическими граничными условиями на верхней и нижней границе и условием без проскальзывания на стенке цилиндра. Естественная частота схода вихрей за цилиндром $St = 0{,}143$ с соответствующим лобовым сопротивлением $C_D = 1{,}328$.

Для синтеза нейросетевого регулятора в режиме с обратной связью по сигналу давления в 12 точках расположенных за цилиндром (см. рис. 1) использовался алгоритм оптимизации политик управления (PPO) из стека свободного пакета OpenAI Baselines.

На один шаг управления приходилось 30 шагов по времени численного моделирования. Один эпизод управления длился 8 периодов естественного схода вихрей $T_{Sh} = 2{,}8$ и переобучение нейронной сети выполнялось на основе истории управления за каждые 20 эпизодов. Нейронная сеть регулятора имела два скрытых слоя по 128 нейронов с нелинейной функцией активации в виде сигмойды в каждом, выход нейронной сети определял параметры распределения плотности вероятности для случайного выбора скорости вращения цилиндра. В качестве агрументов для различного вида критериев оптимизации опробованных в работе выступали осредненные за шаг управления значения лобового сопротивления $\langle C_D \rangle$ и подъемной силы $\langle C_L \rangle$.

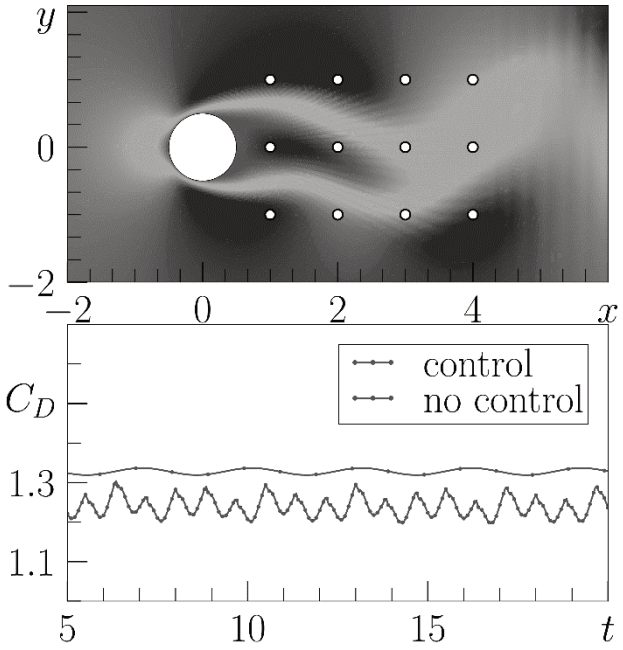


Рис. 1. Сверху: типичное мгновенное распределение величины скорости с учетом расположения датчики давления для управления с обратной связью. Снизу: пример полученного снижения лобового сопротивления для случаев с управлением и без.

Список литературы

1. Choi S., Choi H., Kang S. Characteristics of flow over a rotationally oscillating cylinder at low Reynolds number. // Phys. Fluids. 2002. No. 14. P. 2767–77.
2. Brunton S., Noack B. Closed-loop turbulence control: progress and challenges. // Appl. Mech. Rev. 2015. No. 67. P. 050801.
3. Rabault J., Kuchta M., Jensen A., Réglade U., Cerardi N. Artificial neural networks trained through deep reinforcement learning discover control strategies for active flow control. // J. Fluid Mech. 2019. No. 865. P. 281–302.
4. Niceno B., Hanjalic K. Unstructured Large eddy and conjugate heat transfer simulations of wall-bounded flows. // In Model. Simul. Turbul. Heat Transf. 2005 (Edited by B. Sundén and M. Faghri). P. 32–73.

Работа поддержана РФФИ (гранты № 20-08-01093 № 19-48-543020)

УДК 532.5.032

ОБ ИЗМЕНЕНИИ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА И СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ПЕРЕМЕННОМ ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЕ ЗЕМЛИ

Федюшкин А.И.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

e-mail: fai@ipmnet.ru

Известно, что ускорение силы тяжести Земли $\mathbf{g}$ переменно по пространству и во времени. Это доказано многими измерениями гравитационного поля Земли, и получены ее нестационарные карты, которые продолжают уточнять, используя специальные искусственные спутники Земли [1]. Переменность силы тяжести Земли вызывает особенности течений в мантии, в атмосфере в океане и приводят к искривлению свободной поверхности гидросферы. Эти изменения происходят вследствие нестационарных изменений геодинамических возмущений земной коры, которые в литературе называют короткоживущими подкоровыми локальными возмущениями (КПЛВ) [2]. Влияние на течение жидкости переменности поля силы тяжести Земли, в том числе КПЛВ, до сих пор изучены плохо, хотя описание и прогнозирование характера влияния непостоянства $\mathbf{g}$ на гидросферу имеют фундаментальную значимость и практическую важность для многих сфер жизни и деятельности человека.

В данной работе для двух случаев ускорения силы тяжести Земли (постоянной $\mathbf{g_o}$ и линейной функции координаты $\mathbf{g}(x)$) рассмотрены две модельные задачи в двумерной области длинной L и высотой H.

1) Задача-1 о тепловой конвекции несжимаемой жидкости в замкнутой квадратной области L/H=1, подогреваемой сбоку (на вертикальных стенках заданы разные температуры и концентрации, горизонтальные стенки теплоизолированные) в постоянном $\mathbf{g}_o$ и переменном поле силы тяжести $\mathbf{g}(x) = \mathbf{g}_o x / L$ (где x, y – декартовы оси координат).

2) Задача-2 об изменении свободной поверхности в горизонтальном слое длиной L/H=5, наполовину (H/2) заполненном водой в переменном поле силы тяжести $\mathbf{g}(x) = \mathbf{g}_o x / L$. В задаче-2 анализировалось положение границы раздела «воздух-вода» при мгновенном изменении силы тяжести от постоянной $\mathbf{g}_o$ до $\mathbf{g}(x) = \mathbf{g}_o x / L$. Граничные условия на поверхности раздела «вода – воздух» ставились из условия равновесия поверхностных сил и давления. Положение свободной поверхности определялось, используя метод VOF (Volume Of Fluid).

Математическая модель основана на системе уравнений Навье-Стокса в приближении Буссинеска для однородной несжимаемой жидкости (задача-1) и двухфазной системы «газ- жидкость» в приближении модели «смеси» (задача-2). В модели «смеси» для воздуха и воды используется одна система уравнений, а скорость, плотность или вязкость (f), определяются из уравнения $f = \varepsilon f_{air} + (1-\varepsilon) f_{water}$, где ε – объемная доля воды ($0 < \varepsilon < 1$) находится из решения уравнения переноса для ε : $\partial\varepsilon/\partial t + u\partial\varepsilon/\partial x + v\partial\varepsilon/\partial y = 0$ и параметры для воздуха и воды обозначены через f_{air} , f_{water} .

Для задачи-1 рассмотрен варианты тепловой конвекции, соответствующие числам Грасгофа $Gr=10^4$ и $Gr=10^6$, Прандтля Pr=0.7, Шмидта Sc=10, L/H=1. Результаты представлены для постоянного $\mathbf{g}_o$ и переменного поля силы тяжести $\mathbf{g}(x)$ для установившихся режимов (скорости обезразмерены через кинематическую вязкость ν с масштабом ν / H).

Результаты моделирования задачи-1 (для $Gr=10^6$) и задачи-2 представлены на рис.1 и рис.2. При $Gr=10^4$ влияние переменности $\mathbf{g}$ на конвекцию и распределение температуры и примеси мало, а при $Gr \geq 10^6$ это влияние становится существенным (рис.1).

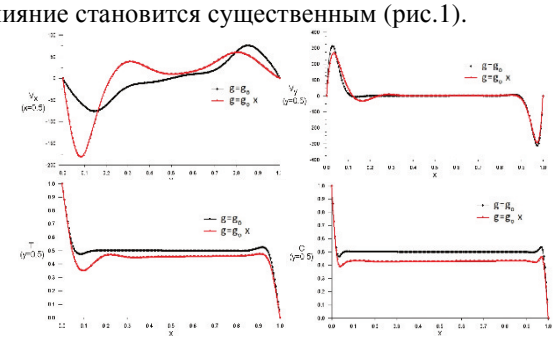


Рис.1. Профили компонент скорости, температуры и концентрации для постоянного и переменного g.

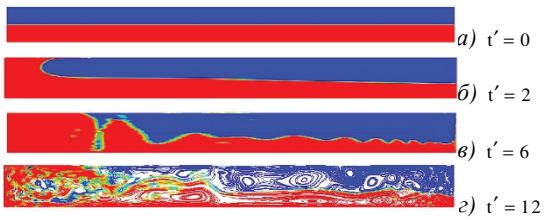


Рис.2. Положение свободной поверхности в моменты безразмерного времени $t' = t\sqrt{g_0 / L} = 0, 2, 6, 12$; *(г) – треки) при изменении силы тяжести от go до g(x)=go x/L.*

Результаты решения задачи-1 о конвекции в квадратной полости, показали, что переменность поля силы тяжести Земли существенно влияет на структуру конвективного течения, на перенос тепла и массы. Решение задачи-2 о горизонтальном слое воды, показало, что при мгновенном изменении ускорения силы тяжести от постоянного $\mathbf{g}_o$ к переменному $\mathbf{g}(x) = \mathbf{g}_o x / L$ происходит сильное волновое изменение свободной поверхности с интенсивным нестационарным течением воды и воздуха в слое.

Список литературы

1. «GRACE-FO 2». National Space Science Data Center. NASA. Retrieved 23 May 2019. https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/ spacecraft/display.action?id=2018-047B
2. Бородзич Э. В. Локальные эндогенные возмущения. // М.: «ИАЦ Энергия». 2008. 60 с.

Работа поддержана госпрограммой тема № АААА-А20-120011690131-7

УДК 536.24

БЕССКАЧКОВОЕ ТОРМОЖЕНИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА В КАНАЛЕ ПОСТОЯННОГО СЕЧЕНИЯ

Хазов Д.Е.

НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: dkhazov@mail.ru

Проблема торможения вязкого сверхзвукового потока в каналах вызывает интерес исследователей и инженеров в связи с важностью этой задачи для современных перспективных воздушно-реактивных двигателей и аэродинамических труб. В случае канала постоянного сечения с непроницаемыми стенками сверхзвуковой поток тормозится через сложную структуру скачков и областей отрывного пристеночного течения, называемую в целом псевдоскачком [1].

В работе [2] проницаемые (перфорированные) границы использовались для разгона потока от звуковых до сверхзвуковых скоростей, а также для выравнивания неравномерности сверхзвукового потока.

Авторы работы [3] провели экспериментальное исследование течения в проницаемой трубке постоянного сечения, установленной в сверхзвуковое сопло. Эксперименты показали, что внутри трубки реализуется переход от дозвукового течения к сверхзвуковому (расходное сопло).

В настоящей работе рассмотрено сверхзвуковое течение в канале постоянного сечения ($d_h = 3.5$ мм) с проницаемыми стенками. Построены одномерная и двумерная (осесимметричная) математические модели.

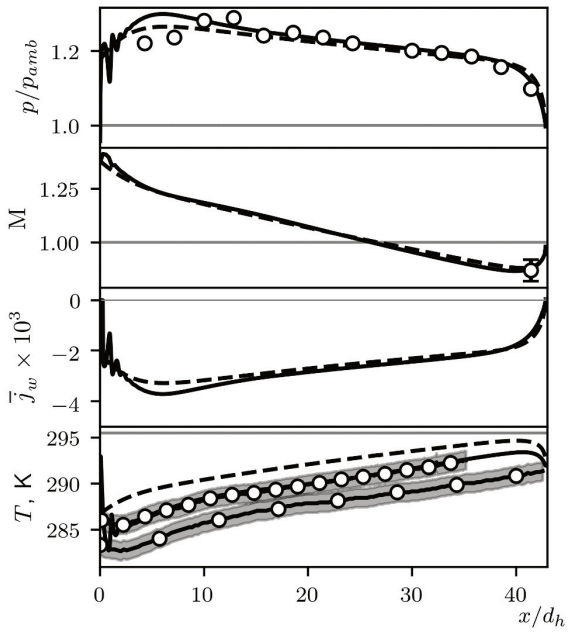


Рис. 1. Изменение основных параметров по длине канала при $P_0^* = 3.98$ атм. Символы — эксперимент [4]; пунктирные линии — расчёт 1D; сплошные линии — 2D

Проведено сравнение с экспериментальными данными [4].

На рис. 1 показаны сопоставления экспериментальных и расчётных данных (статическое давление p; среднемассовое число Маха M; относительный массовый поток через стенку $\bar{j}_w$ и температура стенки канала T) по длине цилиндрического канала при давлении в форкамере $P_0^* = 3.98$ атм. Перед каналом установлено профилированное сопло $\mathrm{M}_{is} = 1.4$. Как видно из рисунка, обе модели (штриховые линии — 1D; сплошные линии — 2D) демонстрируют схожее поведение и предсказывают бесскачковое торможение ($x/d_h \approx 25$) до дозвуковых скоростей.

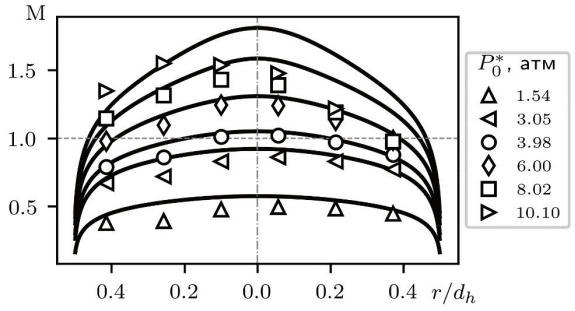


Рис. 2. Радиальное распределение числа Маха в сечении $x/d_h = 41.4$ при различных начальных давлениях. Символы — эксперимент [4]; сплоные линии — расчёт 2D

На рис. 2 показаны радиальные распределения числа Маха в сечении $x/d_h = 41.4$ при различных давлениях в форкамере. Как видно расчёты (2D) хорошо согласуется с экспериментом.

Из представленных результатов можно видеть, что при определённом давлении в форкамере возможен бесскачковый переход от сверхзвуковых скоростей к дозвуковым при течении в канале с проницаемыми стенками.

Список литературы

1. Гуськов О.В., Копченов В.И., Липатов И.И., Острась В.Н., Старухин В.П. Процессы торможения сверхзвуковых течений в каналах. М.: Физматлит. 2008. 168 с.
2. Гродзовский Г.Л., Никольский А.А., Свищев Г.П., Таганов Г.И. Сверхзвуковые течения газа в перфорированных границах. М.: Машиностроение. 1967. 142 с.
3. Виноградов Ю.А., Ермолаев И.К., Леонтьев А.И. Течение газа в сверхзвуковом осесимметричном сопле с проницаемой вставкой. Известия РАН. МЖГ. 1999. № 5. С. 205–208.
4. Leontiev A.I., Zditovets A.G., Kiselev N.A., Vinogradov Yu.A., Strongin M.M. Experimental investigation of energy (temperature) separation of a high-velocity air flow in a cylindrical channel with a permeable wall. Experimental Thermal and Fluid Science. 2019. V. 105. P. 206–215.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы АААА-А16-116021110200-5 НИИ механики МГУ при частичной поддержке гранта РФФИ (грант № 18-08-00413)

УДК 536.25

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В ОКРЕСТНОСТИ КУБА, ПОГРУЖЕННОГО В ТУРБУЛЕНТНЫЙ СВОБОДНОКОНВЕКТИВНЫЙ ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ НА ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛАСТИНЕ

Чумаков Ю.С., Левченя А.М., Смирнов Е.М.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

e-mail: levchenya_am@spbstu.ru

Знания о процессах теплообмена в случае турбулентного режима свободной конвекции, развивающейся у вертикальных нагретых поверхностей, важны в различных приложениях. В качестве базового варианта течений данного рода во многих работах рассматривается задача о развитии турбулентного свободноконвективного пограничного слоя вдоль вертикальной гладкой пластины.

С другой стороны, в ряде практических случаев свободноконвективный пограничный слой, образующийся на нагретой вертикальной поверхности, может быть существенно возмущен одиночным препятствием или совокупностью нескольких препятствий. Такими «макрошероховатостями» могут быть элементы конструкции промышленных устройств или жилых зданий. Препятствия могут быть и преднамеренно введены в свободноконвективный пограничный слой, чтобы управлять его поведением, в том числе, в целях интенсификации теплообмена.

В данной работе представляются результаты экспериментального исследования полей осредненной по времени скорости, осредненной температуры, интенсивности пульсаций скорости и температуры, а также корреляции пульсаций скорости и температуры в окрестности куба, установленного на вертикальной нагреваемой пластине, вдоль которой развивается свободноконвективный пограничный слой. Исследования выполнены на стенде, созданном в СПбПУ в 90-х годах [1] и модернизированном в последние два года. Свободноконвективное движение воздуха формировалось у поверхности изотермической (T_w=60°C) алюминиевой пластины высотой 4,95 м и шириной 0,90 м. Пограничный слой на пластине без установленного препятствия близок к статистически двумерному. Возмущающий слой низкотеплопроводный куб с ребром a=40 мм помещался в область турбулентного течения – на расстоянии 1,8 м от нижней кромки пластины, где толщина пограничного слоя составляла около 120 мм.

Систематические измерения в средней (проходящей через центр куба) вертикальной плоскости (она же – плоскость симметрии) выполнены методами термоанемометрии и термометра сопротивления. Для измерения актуальных значений скорости и температуры использовался двухниточный зонд с чувствительными элементами в виде вольфрамовых проволочек диаметром 5 мкм и длиной 3,5 мм.

Результаты измерений сопоставляются с данными численного моделирования на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса (RANS), замкнутых по k-ω SST модели турбулентности. Применялся «конечно-объемный» гидродинамический код общего назначения ANSYS FLUENT версии 16.2. Геометрическая конфигурация и условия, принятые в расчетах (размер куба, тепловые условия на его поверхности, параметры набегающего на него пограничного слоя), близки к условиям проведенных экспериментов. Детальное описание аналогичных расчетов, проведенных для случая обтекания кругового цилиндра, изложены в работе [2].

На рис.1а приведена расчетная картина предельных линий тока и полутоновая заливка поверхностей пластины и куба, отражающая распределение модуля напряжения трения. Там же показана плоскость симметрии течения, в которой проводились измерения. На рис.1б приведены распределения модуля средней скорости по нормальной координате (y) для нескольких расстояний (координата x) от передней грани куба. Скорость нормирована на максимальное значение в невозмущенном набегающем слое (при x=111 мм). Результаты измерений сопоставляются с данными сопроводительных RANS-расчетов.

Полученные расчетно-экспериментальные данные позволяют сделать важные заключения о структуре течения и особенностях теплопереноса в передней зоне с подковообразными вихрями, в ближнем следе за препятствием и в зоне последующего восстановления свободноконвективного пограничного слоя, а также определить области течения, наиболее сложные для измерений.

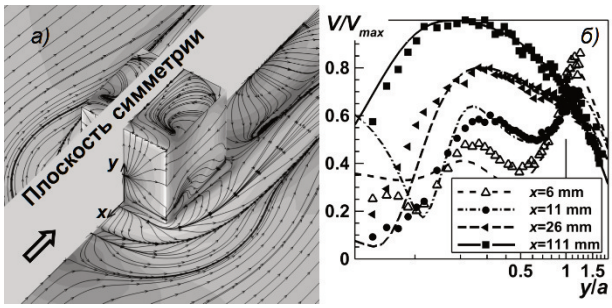


Рис. 1. (а) Схема течения с расчетным полем модуля напряжения трения и поверхностными линиями тока на пластине и препятствии; (б) расчетные (линии) и экспериментальные (символы) профили скорости на разном удалении от передней грани куба.

Список литературы

1. Чумаков Ю.С. Распределение температуры и скорости в свободноконвективном пограничном слое на вертикальной изотермической поверхности // ТВТ. 1999. Т. 37. № 5. С. 744–749.
2. Smirnov E.M., Levchenya A.M., Zhukovskaya V.D. RANS-based numerical simulation of the turbulent free convection vertical-plate boundary layer disturbed by a normal-to-plate circular cylinder // IJHMT. 2019 V. 144. P. 118573–118584.

Исследование поддержано Российским научным фондом (грант № 18-19-00082)

УДК 532.54

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАНО- И МИКРО-ШЕРОХОВАТОСТЕЙ НА ЗАКРУТКУ ПОТОКА В ОГРАНИЧЕННОМ ВИХРЕВОМ ПОТОКЕ

Шарифуллин Б.Р.[1,2], Наумов И.В.[1,2], Ломакина В.А.[1,2], Окулов В.Л.[1,2]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
[2] Новосибирский государственный университет

e-mail: sharifullinbulat@mail.ru

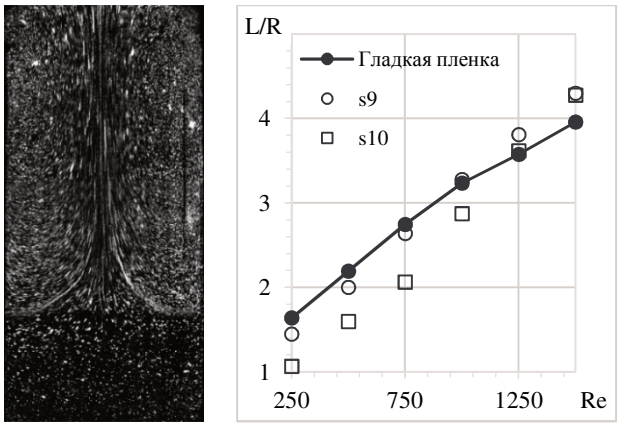
Разработка вихревых аппаратов для улучшения тепло-массообменных процессов в химических, биологических и энергетических технологиях (Shtern 2018) [1] является важнейшим практическим направлением исследования закономерностей массообменных процессов. При этом важным аспектом изменения массо- и теплообменных процессов в вихревых аппаратах становится снижение трения о его боковые стенки. В связи с этим особый интерес в исследованиях массопереноса вызывает применение уже сформированных самой природой решений и закономерностей. Среди многочисленных энергоэкономичных решений природы, пожалуй, самым неожиданным стало использование шероховатостей на поверхности тел для экономии энергии при их движении.

В качестве простой модели для проведения исследований перспективно использовать замкнутый цилиндр, в котором ползучее течение жидкости формируется одним из торцов – вращающимся диском [2]. При вращении диска на жидкость действует центробежная сила. Под её действием происходит отток жидкости вдоль крышки от оси к периферии; затем жидкость, вращаясь, опускается вниз вдоль стенок цилиндра и, разворачиваясь сходится к оси, образуя центральный винтообразный вихрь с восходящим потоком у оси. Под диском возникает центробежная ячейка циркуляции жидкости, которая при увеличении числа Рейнольдса увеличивается в глубь цилиндрического контейнера [3].

Целью настоящей работы является исследование влияния шероховатостей, нанесенных на вращающийся диск, на распространение ячейки циркуляции.

Исследование проводилось в длинном цилиндрическом контейнере с радиусом R = 47 мм и высотой $h = 10R$. Контейнер заполнялся 66% водным раствором глицерина с плотностью 1170 кг/м^3 и кинематической вязкостью ν = 11,3 мм^2/с при комнатной температуре (22,6 °C). Вихревое движение жидкостей генерировалось верхним диском, который вращался с угловой скоростью ω. Интенсивность течения характеризуется числом Рейнольдса $\mathrm{Re} = \omega R^2/\nu$. Всего было исследовано 7 различных покрытий, вытравленных на пленках, а также для сравнения гладкая пленка без покрытия и чистый полированный диск из оргстекла. Шероховатости представляют собой различные комбинации трех основных структур: полоски, цилиндры и «нано-трава». Длина ячейки циркуляции L, прилегающей к вращающемуся торцу или к границе раздела, определялась визуально по изображениям трековой системы в выделенном сечении [4], где треки от периферийного течения сходятся к оси (см. рис. 1(а)).

В ходе работ было получено, что разницы между гладкой пленкой и чистым полированным диском нет. Было выявлено, что наличие шероховатостей увеличивает распространение ячейки циркуляции. Исходя из влияния на структуру потока все исследованные покрытия можно разделить на три группы: 1) небольшие шероховатости, слабо влияющие на структуру потока, 2) полоски, эффект которых заметен при больших Re, 3) шероховатости с цилиндрами и «нано-травой», эффект от которых наибольший. Так же было выявлено, что структуры, состоящие только из полосок при малых Re имеют обратный эффект, уменьшающий длину ячейки циркуляции (см рис. 1(б)).



(а) *(б)*

Рис.1. Пример визуализации течения при Re = 500 (а), зависимость длины ячейки от Re для гладкой пленки и пленок с полосками (б).

Список литературы

1. Shtern V.N. Counterflows // New York: Cambridge University Press. 2012. P. 488.
2. Hills C.P. Eddies induced in cylindrical containers by a rotating end wall // Phys. Fluids. 2001. V. 13. P. 2279–2286.
3. Herrada M.A., Shtern V.N., Torregrosa M.M. The instability nature of Vogel-Escudier flow // J. Fluid Mech. 2015. V. 766. P. 590–610.
4. Naumov I.V., Dvoynishnikov S.V., Kabardin I.K., Tsoy M.A. Vortex breakdown in closed containers with polygonal cross-sections // Phys. Fluids. 2015. V. 27. P. 124103.



СЕКЦИЯ 2
Гидродинамика и тепломассообмен в многофазных системах



УДК 621.45.034.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАСПЫЛЕНИЯ ВОДОУГОЛЬНОЙ СУСПЕНЗИИ

Ануфриев И.С., Копьев Е.П., Шадрин Е.Ю.

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

e-mail: anufriev@itp.nsc.ru

Одним из перспективных видов топлива являются водоугольные суспензии (ВУТ) [1]. Использование этого вида топлива позволяет утилизировать угольные отходы, повышая эффективность сжигания низкосортных углей и т.д. Форсунки, используемые для распыления данного топлива, должны соответствовать ряду специальных требований. Такие форсунки не должны иметь узких каналов, чтобы предотвратить их засорение, и должны быть изготовлены из износостойких материалов.

Одним из возможных решений проблемы распыления ВУТ является использование оригинальной пневматической форсунки [2]. Более ранние испытания [3] показали эффективность диспергирования ВУТ и длительный срок службы такого устройства. Для широкого практического использования форсунок этого типа важно определить диапазоны рабочих параметров, обеспечивающих формирование стабильного газокапельного потока и необходимое распыление для эффективного сгорания топлива.

В данной работе в лабораторных условиях проведены исследования характеристик газокапельного потока, формируемого такой форсункой. Исследования проведены в диапазоне расхода жидкости 50-100 г/с и избыточного давления воздуха в форсунке 0,3-0,6 МПа. С использованием теневого метода исследован газокапельный поток в указанном диапазоне режимов. На рисунке 1 представлена теневая фотография газокапельного потока, полученная при распылении жидкости исследуемой пневматической форсункой. Для экспериментов использовалось следующее оборудование: цифровая CCD-камера ImperX B6620 с матрицей 6600x4400 пикселей; длиннофокусный микроскопический объектив Infinity K-2 Distamax с усилителем NTX-2x Amplifier и объективом CF-2, позволяющие получить увеличение до 7:1. Размер одного пикселя на экране при таком увеличении соответствовал 1 мкм. В качестве источника света использовался фоновый экран: кювета, заполненная спиртовым раствором родамина.

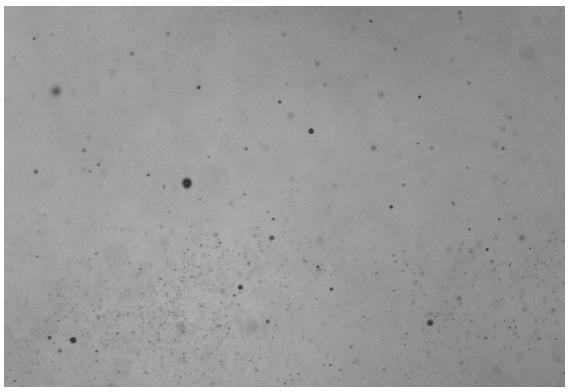


Рис. 1. Характерная теневая фотография газокапельного потока при распылении жидкости пневматической форсункой. Размер измерительной области – 6x4 мм.

В результате цифровой обработки теневых изображений проанализирован дисперсный состав газокапельного потока. Получены распределения капель по размерам в широком диапазоне режимов. Полученные результаты позволяют прогнозировать устойчивые режимы работы форсунки при распылении водоугольного топлива.

Список литературы

1. Мингалеева Г.Р., Нигматуллин Р.М., Шамсутдинов Э.В. Перспективы использования водоугольного топлива в России // Тр. Академэнерго. 2009. №1. С. 83–95.
2. Пат. 2346756, РФ. Пневматическая форсунка. Автор Л.И. Мальцев, опубл.20.02.2009, приоритет от 15.05.2007.
3. Мальцев Л.И., Кравченко И.В., Лазарев С.И., Лапин Д.А. Сжигание каменного угля в виде водоугольной суспензии в котлах малой мощности // Теплоэнергетика.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-29-24007-мк)

УДК 532;519.6

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ОДИНОЧНЫХ ПУЗЫРЬКОВ В МИКРОКАНАЛЕ С ПОПЕРЕЧНЫМ СЕЧЕНИЕМ В ФОРМЕ ДЕЛЬТОИДЫ

Булатова А.З., Солнышкина О.А., Фаткуллина Н.Б.

Центр микро- и наномасштабной динамики дисперсных систем,
Башкирский государственный университет, Уфа

e-mail: bulatova29@yandex.ru

Актуальность детального изучения поведения пузырьковых жидкостей в пористых средах обусловлена широким спектром их использования во многих технологических и промышленных процессах, в частности при производстве композитных материалов, а также при разработке био-, микро- и других технологий. Как известно, макроскопическое поведение комплексных систем является результатом процессов, происходящих на микроуровне в масштабах одиночных микрочастиц. В настоящее время рассматриваются различные микромодели представления пористой среды: капиллярная, где пористая среда моделируется как сеть микроканалов сложных форм с различными структурными особенностями, и структурная, где поровое пространство, в котором происходит течение флюида, образуется между распределенными в некоторой области твердыми элементами различных форм и взаимного расположения. Особенности геометрии порового канала оказывает существенное влияние на происходящие процессы.

В данной работе проведено параметрическое исследование динамики несжимаемых пузырьков в вязкой жидкости при медленном периодическом течении в микроканале с поперечным сечением в форме дельтоиды (Рис. 1). Выбор данной геометрии обусловлен схожестью с пространством между цилиндрическими волокнами при максимально плотной упаковке нитей в образце, образующими пористую среду, например, при производстве композиционных материалов.

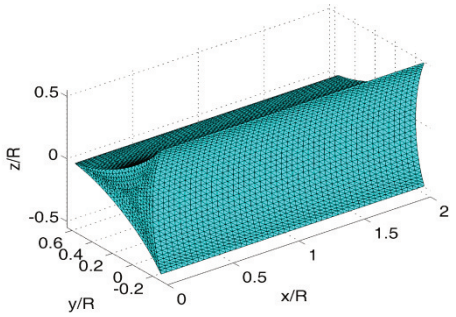


Рис. 1. Триангуляция канала с поперечным сечением в форме дельтоиды.

Поскольку рассматривается медленное течение, то силы вязкости, возникающие при течении жидкости, гораздо значительнее сил инерции, связанных с ускорением или торможением частиц жидкости, что дает возможность полностью пренебречь инерционными членами в расчетах. Все изучаемые процессы происходят в изотермических условиях, без учета межмолекулярных сил Ван-дер-Ваальса. Предполагается, что динамической вязкостью и плотностью газа можно пренебречь по сравнению с соответствующими параметрами жидкости. В этом случае рассматриваются модели идеального газа и вязкой жидкости, движение которых описывается уравнениями Стокса. В качестве основы численного подхода для решения рассматриваемых задач выбран метод граничных элементов, который очень эффективен при исследовании трехмерных задач в областях со сложной геометрией и при моделировании объектов с произвольной деформацией, поскольку все расчеты связаны только с границами.

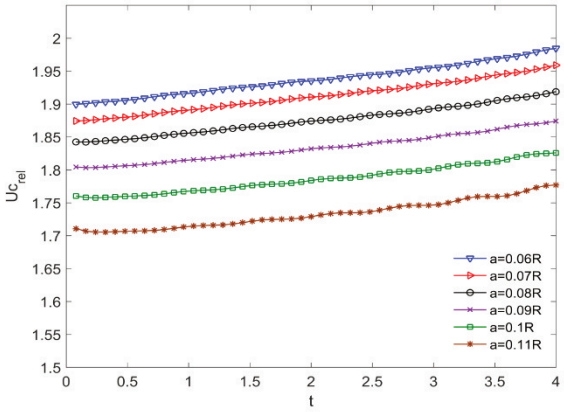


Рис.2. Относительная скорость центра масс пузырька, расположенного на осевой линии канала с поперечным сечением в форме дельтоиды.

Рассмотрено влияние начального радиуса пузырька, его положения относительно осевой линии канала при постоянном значении перепада давления и вязкости окружающей жидкости на деформацию пузырька, изменение его формы, скорость центра масс относительно средней скорости течения в канале. Показано, что при увеличении размера пузырька его относительная скорость уменьшается (рис. 2). При таком медленном течении форма пузырьков, находящихся на осевой линии канала, отличается от сферической незначительно, независимо от их радиуса в рассматриваемом временном промежутке. Поскольку больших деформаций пузырьки не претерпевают, то значительного изменения средней скорости во времени не происходит. Пузырек движется равномерно с практически постоянной скоростью. Также показано, что деформация пузырьков, расположенных на некотором равном расстоянии от осевой линии канала в трех направлениях, отличается значительно. Кроме того, изучен характер изменения относительной скорости для таких удаленных от центра пузырьков.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РФФИ (грант № 18-38-20102)

УДК 536.4

ВСКИПАНИЕ СТРУИ ПЕРЕГРЕТОЙ ВОДЫ ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ЧЕРЕЗ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ И КВАДРАТНЫЙ КАНАЛЫ

Бусов К.А., Мажейко Н.А.

Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург

e-mail: kbusov@itp.uran.ru

Актуальность изучения струй интенсивно вскипающих жидкостей [1] связана, в частности, с задачами регулируемого распыления различных веществ, т.к. перегрев жидкостей является эффективным средством для изменения формы, структуры и поведения течения. Проведенные исследования показали, что в зависимости от интенсивности вскипания, использования различных каналов и подбора деталей различной геометрии за выходным срезом насадка, могут наблюдаться неожиданные и труднопредсказуемые явления: полное раскрытие струи (кризис формы) перегретой жидкости [2], резкое снижение до нулевых значений (кризис) реактивной тяги [3], присутствие в переходных режимах вскипания флуктуаций с расходящимся спектром мощности по закону $1/f$ [4], потеря устойчивости течения вскипающего потока [5]. Для вывода обобщающих критериев и выявления причин проявления тех или иных аномальных явлений, проявляющихся во вскипающей струе, целесообразно проведение экспериментов с каналами различной геометрической формы.

Цель данной работы заключалась в экспериментальном исследовании вскипания струй перегретой воды, истекающей через короткие квадратный и треугольный каналы.

Эксперименты проводились на лабораторной установке кратковременного действия. Главная часть экспериментального стенда – рабочая камера высокого давления, изготовленная из нержавеющей стали объемом 0.65 л. Истечение перегретой воды осуществлялось через короткие квадратный и треугольный каналы с острыми входными и выходными кромками в атмосферу. Каналы были изготовлены в титановой пластине. Перевод жидкости в метастабильное (перегретое) состояние осуществлялся резким снижением давления, благодаря малой длине каналов l=0.7мм. Начальные параметры (температура, давление) внутри сосуда соответствовали условиям на линии фазового равновесия жидкость – пар и изменялись в широких пределах: T=380 – 580 K, p=0.1 – 10 МПа.

Проведенное изучение вскипающих струй, истекающих через короткий квадратный канал, показало, что до реализации механизма интенсивного парообразования (до температуры T=480 K) наблюдается течение жидкости подобное тому, какое наблюдается при истечении через короткий цилиндрический канал. Так, при малых перегревах струя имела цилиндрическую или стержневую форму, характерную для холодной жидкости. Для умеренных перегревов струя приобретала вид конуса с различными углами при вершине.

В случае высоких перегревов, когда в потоке реализовывался механизм интенсивного гетерогенного зародышеобразования, наблюдалось истечение струи в виде полого конуса с максимальным углом раскрытия при вершине α=180º (полный развал струи). Данная форма струи наблюдалась в достаточно широком температурном интервале от T=210 ºС до T=270 ºС. При этом основная масса вскипающей жидкости истекала из углов короткого канала. При температуре T=270 ºС наблюдалось неустойчивое истечение струи – большие колебания угла раскрытия от 30º до 180º за короткие промежутки времени. Данные резкие изменения угла раскрытия свидетельствуют о смещении сечения вскипания вглубь канала. При приближении термодинамических параметров к условиям интенсивного флуктуационного зародышеобразования струя вновь приобретала коническую форму с небольшим углом раскрытия.

В случае истечения струи перегретой жидкости через короткий треугольный канал, никаких кризисных явлений (полного развала) обнаружено не было. При умеренных и высоких перегревах наблюдалось истечение струи в виде конуса с практически неизменным углом раскрытия при вершине.

Таким образом, исследования показали, что геометрия короткого канала существенным образом влияет на форму струи вскипающей жидкости. Использование каналов различной формы и реализация механизма интенсивного зародышеобразования в перегретой жидкости могут служить эффективным инструментом в задачах регулируемого распыления вещества.

Список литературы

1. Скрипов В.П. Метастабильная жидкость. М.: Наука. 1972. 312 с.
2. Решетников А.В., Мажейко Н.А., Скрипов В.П. Струи вскипающих жидкостей // ПМТФ. 2000. Т. 41. № 3. С. 125–132.
3. Исаев О. А., Неволин М. В., Скрипов В. П., Уткин С. А. Реакция струи вскипающей жидкости // ТВТ. 1988. Т. 26. №. 5. С. 1028–1030.
4. Koverda V. P., Skokov V. N. An origin of 1/f fluctuations at a nonequilibrium phase transition, Physica A. 1999. V. 262. P. 376–386.
5. Бусов К.А., Решетников А.В., Мажейко Н.А., Капитунов О. А. Исследование влияния пассивного завихрителя на истечение перегретой жидкости // ПМТФ. 2019. Т. 60. № 1. С. 62–68.

Работа поддержана РФФИ (грант № 19-08-00091), Советом по грантам Президента Российской Федерации (грант № МК-1933.2020.8).

УДК 536.4

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУИ ВСКИПАЮЩЕЙ ВОДЫ МЕТОДОМ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕПЛОМЕТРИИ

Бусов К.А.[1], Мажейко Н.А.[1], Жилкин Б.П.[2], Плотников Л.В.[2]

[1] Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург
[2] Уральский федеральный университет, Екатеринбург

e-mail: kbusov@itp.uran.ru

Струи вскипающих жидкостей нашли применение во многих технических устройствах (струйный принтер, опреснительные установки, системы очистки зданий, пожарная техника и т.д.). В Институте теплофизики УрО РАН изучение струй перегретых жидкостей при быстрой декомпрессии сосудов высокого давления, применительно к задачам безопасности энеретического оборудования, были инициированы академиком РАН В.П. Скриповым. В лабораторных исследованиях были обнаружены особенности в процессе вскипания и поведении струй различных жидкостей [1-8]. В частности, установлен эффект течения метастабильной жидкости только в радиальном направлении (полный развал), резкое снижение до нулевых значений реактивного усилия и присутствие в переходных режимах вскипания флуктуаций с расходящимся спектром мощности по закону 1/*f*. Но, несмотря на продолжительность проводимых исследований, остается ряд совершенно не изученных вопросов. Например, задача о распределении температуры в истекающей струе.

Цель данной работы заключалась в применении бесконтактного тепловизионного метода для изучения распределения температуры в факеле распыления двухфазной струи, определения ее максимального значения и анализ структуры вскипающего потока на основании полученных термограмм.

Эксперименты проводились на лабораторной установке, главной частью которой являлась рабочая камера высокого давления, изготовленная из нержавеющей стали. Сосуд имел цилиндрическую форму вместимостью около 0.6 л. Истечение перегретой воды осуществлялось через короткий цилиндрический канал с острыми входными и выходными кромками в атмосферу с высокой скоростью сброса давления. Начальные параметры (температура, давление) жидкости внутри сосуда соответствовали условиям на линии фазового равновесия жидкость – пар и изменялись в соответствующих пределах: T=380 – 570 K, p=0.1 – 8.6 МПа. Инфракрасная съемка осуществлялась с помощью тепловизора марки Testo 890-2.

Проведенные исследования показали, что струя вскипающей жидкости достаточно чувствительна к изменению кинетики парообразования в единице объема жидкости за единицу времени, что находит отражение в изменении ее формы. При увеличении степени пересыщения системы наблюдается несколько различных форм струи.

При малых перегревах струя имеет цилиндрическую или стержневую форму, характерную для холодной жидкости. Для умеренных перегревов струя приобретает вид конуса с различными углами при вершине. В случае высоких перегревов, когда в потоке реализуется механизм интенсивного гетерогенного зародышеобразования [1, 9], наблюдается истечение струи в виде полого конуса с большим углом раскрытия при вершине (~110º). При приближении термодинамических параметров к условиям интенсивного флуктуационного зародышеобразования коническая форма струи постепенно сменяется параболической формой.

Применение тепловизионной диагностики вскипающей струи позволило определить максимальную температуру за выходным срезом короткого канала и получить эмпирическую зависимость ее изменения для различных степеней перегрева. В ходе исследований было установлено, что зависимость изменения максимальной температуры за каналом от температуры насыщения жидкости имеет линейный характер.

На основании термограмм были выделены имеющиеся неоднородности в факеле распыления струи перегретой жидкости и получены распределения температуры в различных сечениях вскипающего потока.

Список литературы

1. Скрипов В.П. Метастабильная жидкость. М.: Наука. 1972. 312 с.
2. Исаев О. А., Неволин М. В., Скрипов В. П., Уткин С. А. Реакция струи вскипающей жидкости // ТВТ. 1988. Т. 26. № 5. С. 1028–1030.
3. 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. 2013. V. 22. №. 3. P. 174–193.
4. Решетников А.В., Мажейко Н.А., Скрипов В.П. Струи вскипающих жидкостей // ПМТФ. 2000. Т. 41. № 3. С. 125–132.
5. Решетников А. В., Бусов К. А., Мажейко Н. А., Скоков В. Н., Коверда В. П. Переходные режимы вскипания струй перегретой воды // Теплофизика и аэромеханика. 2012. Т. 19. № 3. С. 359–367.
6. Busov K.A., Reshetnikov A.V., Mazheiko N.A. et al. Atomization of a Sheet Jet of Superheated Water Using a Passive Swirler // Microgravity Sci. Technol. 2020. V. 32. P. 99–104.
7. Koverda V. P., Skokov V. N., An origin of 1/f fluctuations at a nonequilibrium phase transition, Physica A. 1999. V. 262. P. 376–386.
8. Reshetnikov A.V., Busov K.A., Kapitunov O.A., Skokov V.N., Explosive boiling-up in a swirl jet of superheated ethanol // Int. J. Heat Mass Transf. 2020. V. 149. P. 119210.
9. Скрипов, В.П., Синицын, Е.Н., Павлов, И.А. и др. Теплофизические свойства жидкостей в метастабильном состоянии. М.: Атомиздат. 1980. 208 с.

Работа поддержана РФФИ (грант № 19-08-00091), Советом по грантам Президента Российской Федерации (грант № МК-1933.2020.8).

УДК 532.5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРАВИТАЦИОННОГО РАССЛОЕНИЯ ПОЛИДИСПЕРСНОЙ ЭМУЛЬСИИ ТИПА ВОДА В МАСЛЕ

Валиуллина В.И.[1], Муллаянов А.И.[1], Мусин А.А.[1], Киреев В.Н.[1], Ковалева Л.А.[1]

[1] Башкирский государственный университет, Уфа

e-mail: vilenches@gmail.com

Большинство эмульсий, которые встречаются в природе, являются полидисперсными системами. Нефтяные дисперсные системы (НДС) отличаются высокой степенью полидисперсности. Разделение нефтяных эмульсий (деэмульсация) является одним из важнейших процессов подготовки нефти. Наряду с различными методами разделения эмульсий одно из лидирующих позиций занимают методы гравитационного осаждения и центрифугирования. Исследование процесса расслоения НДС представляет как научный, так и практический интерес.

Данная работа посвящена исследованию процесса расслоения модельных эмульсий типа «вода в масле» методами физического и математического моделирования.

Модельные эмульсии, состоящие из воды, поверхностно-активного вещества (ПАВ) и масла, изготавливаются по следующей методике: ПАВ – Span 80 растворяется в вазелиновом масле в количестве 0,5 % (wt), затем производится добавление дистиллированной воды 50% (wt) в объем масла при перемешивании с помощью верхнеприводной мешалки при 500 обр/мин, полученная эмульсия оставляется на 12 часов.

Далее проводятся микроскопические исследования эмульсии (см. рис. 1) с помощью микроскопа Olympus IX71 с последующей обработкой изображения в программе Matlab. Для этого в разные моменты времени из объема эмульсии отбираются несколько образцов, которые отличаются глубиной отбора.

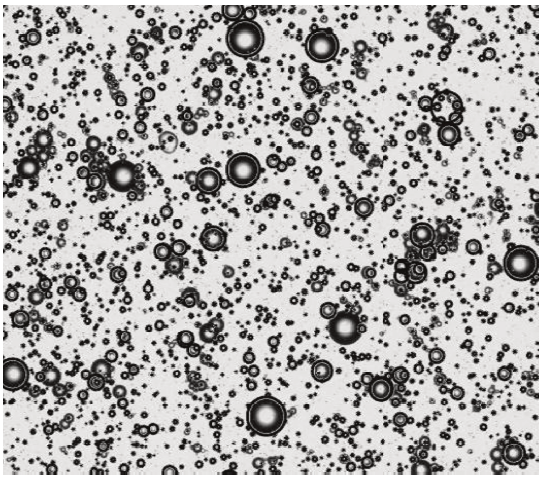


Рис.1. Фотография образца эмульсии. На фотографии черные окружности являются эмульсионными каплями, а синие окружности – определенные с помощью программы

На основе полученных данных, строятся гистограммы распределения капель по размерам (см. рис. 2). Определяются среднечисленный, среднеповерхностный и среднемассовый размеры капель эмульсии, стабильность эмульсии и степень ее полидисперсности. Вязкость эмульсии определяется на вискозиметре Brookfield DV II+Pro.

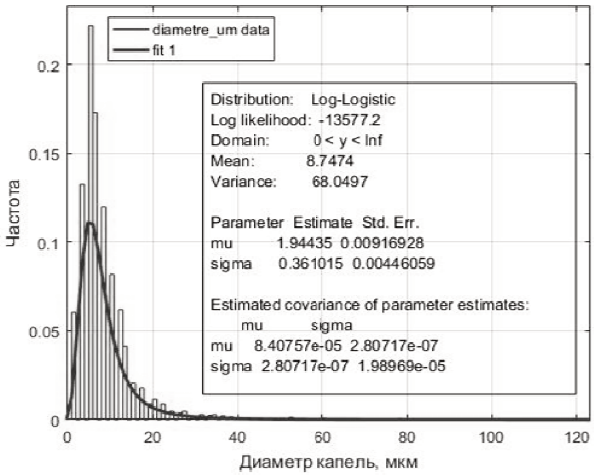


Рис.2. Гистограмма распределения капель по размерам

Математическое моделирование процесса расслоения полидисперсной системы строится на основе одножидкостного приближения. Полидисперсная система рассматривается как совокупность квазимонодисперсных систем со своим значением размера капель эмульсии. Такой подход позволяет снизить размерность системы в несколько раз. Для каждой из квазимонодисперсной составляющей дисперсной фазы и для дисперсионной среды записываются осредненные уравнения сохранения массы и количества движения. Относительная скорость фаз определяется из баланса сил для капель эмульсии. Математическая модель сводится к решению системы уравнений диффузионного типа. В данной постановке макроскопическим движением смеси пренебрегается. Задача решается в одномерной постановке. Производится адаптация модели под экспериментальные данные.

Список литературы

1. Lv G. et al. Characterization of the addition of lipophilic Span 80 to the hydrophilic Tween 80-stabilized emulsions //Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2014. Т. 447. С. 8–13.
2. Schmidts T. et al. Influence of hydrophilic surfactants on the properties of multiple W/O/W emulsions //Journal of colloid and interface science. 2009. Т. 338. №. 1. С. 184–192.
3. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М.: Наука. 1987. Т. 1, 2. 464 с.

Работа поддержана РНФ (грант № 19-11-00298)

УДК 532.5

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА ТЕЙЛОРА В МИНИКАНАЛЕ КВАДРАТНОГО СЕЧЕНИЯ

Вожаков И.С., Роньшин Ф.В.

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

e-mail: vozhakov@gmail.com

Двухфазные микросистемы широко распространены в различных отраслях промышленности и машиностроения. Одной из наиболее распространенных схем течения, возникающих в газожидкостных микросистемах, является режим Тейлора, который состоит из вытянутых пузырьков, которые в продольном размере обычно во много раз превышающим диаметр канала. Пузырьки принимают характерную капсульную форму и могут либо полностью, либо почти полностью заполнять поперечное сечение канала, где тонкая пленка жидкости обычно отделяет их от стенки канала. Пленочное испарение является одним из преимуществ таких систем, что приводит к существенному росту производительности в теплообменниках. Из-за хорошей способности теплопередачи, сопровождаемой фазовым переходом и небольшим перепадом температуры, это явление будет подходящим решением для уменьшения размеров и веса тепловых систем. В микроканалах влияние гравитации на динамику жидкости нивелируется внутренними силами, поэтому может практически без изменений использоваться в космической сфере.

Размеры пузырьков и жидких пробок очень важны для определения перепада давления и скорости теплопередачи при тейлоровском течении. Длины пузырьков существенно зависят от отношения приведенных скоростей газа и жидкости. Было обнаружено, что при изменении геометрии смесителя, длина пузыря варьируется до 300% при одинаковых условиях эксплуатации [1]. Авторы также отметили, что гравитационные эффекты и влияние свойства жидкости (в частности, плотность и вязкость) незначительны. В работе [2] авторы использовали CFD для моделирования изотермического тейлоровского режима в двумерном осесимметричном горизонтальном микроканале. Авторами показано, что пузыри Тейлора всегда окружены жидкостью, а разрыв пленки происходит только в очень специфических условиях. Таким образом контактный угол не влияет на течение в режиме Тейлора. Авторы в работе [3] изучали экспериментально и численно влияние свойств флюида и условий эксплуатации на образование пробок в микроканалах.

В настоящей работе проведено численное исследование двухфазного течения в миниканале в условиях микрогравитации. Двухфазное течение моделируется с использованием пакета OpenFoam с помощью метода объема жидкости (VOF). Исследование проводилось в канале с квадратным сечением со стороной 1 мм. Длина канала составляла 20 мм (рис. 1). Газ и жидкость вводятся через смеситель Т-типа. В канале, через который вводится газ, контактный угол был установлен равным 90 градусам. В остальной части канала на стенке были установлены гидрофильные условия (контактный угол – 0 градусов). Показана сходимость результатов расчета VOF-методом с уменьшением размеров ячеек.

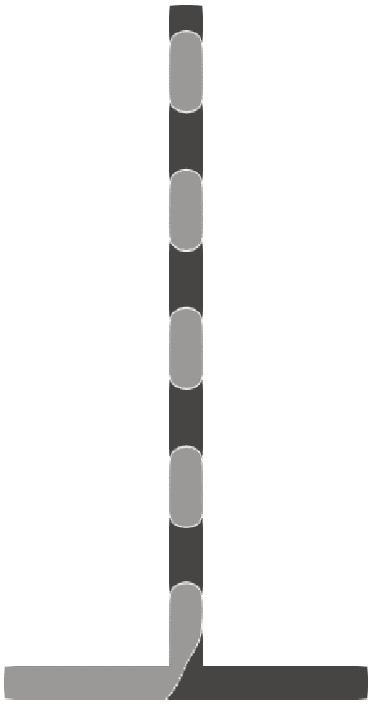


Рис. 1 – Распределение газа (светлый) и жидкости (темный) по каналу с приведенными скоростями 0,1 м/с для обеих фаз.

Проведено численное исследование режима Тейлора. Показано, что качественно картины течения соответствуют известным экспериментальным данным. Измерены длины пузырьков и жидких перемычек при различных расходах газа и жидкости. Показано, что длина пузырьков сильно зависит от расхода газа и слабо зависит от расхода жидкости. В безразмерных параметрах предложена зависимость длины пузырька от скорости газа. Проведено сравнение расчетного перепада давления с известными эмпирическими моделями. Проведена оценка толщины пленки жидкости между пузырьком и стенкой.

Список литературы

1. Qian D., Lawal A. Numerical study on gas and liquid slugs for Taylor flow in a T-junction microchannel // Chemical Engineering Science. 2006. V. 61. No. 23. P. 7609–7625.
2. Gupta R., Fletcher D. F., Haynes B. S. On the CFD modelling of Taylor flow in microchannels // Chemical Engineering Science. 2009. V. 64. No. 12. P. 2941–2950.
3. Abadie T., Aubin J., Legendre D., Xuereb C. Hydrodynamics of gas–liquid Taylor flow in rectangular microchannels // Microfluidics and nanofluidics. 2012. V. 12. No. 1–4. P. 355–369.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-31-70038

УДК 532.529.5

ЛОКАЛЬНЫЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПУЗЫРЬКОВОГО ПОТОКА В СБОРКЕ СТЕРЖНЕЙ

Воробьев М.А., Кашинский О.Н.

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

e-mail: vorobyev@itp.nsc.ru

В настоящее время разностороннее применение газожидкостных течений опережает процесс их детального исследования. Одна из возникающих при этом проблем связана с отсутствием информации о взаимосвязи локальной гидродинамической структуры и теплообменных характеристиках при течении двухфазных смесей в каналах с наличием в них элементов, возмущающих течение, характерных для современных технологий. Развитие теоретических и численных моделей описания структуры течения и теплообмена в газожидкостном потоке в каналах сложной геометрии сдерживается отсутствием достаточного количества экспериментальной информации. В литературе встречаются работы, посвященные экспериментальному исследованию локальной структуры пузырьковых потоков в сборках стержней [1-5], но основное внимание в них уделяется определению профилей локального газосодержания и скоростей газовых включений. В связи с этим настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию локальных теплогидравлических характеристик пузырькового течения в канале, имитирующем геометрию тепловыделяющей сборки в квадратной компоновке 3x3.

Экспериментальная установка представляет собой замкнутый по жидкости и разомкнутый по газу контур. Роль рабочего канала выполняет оргстеклянная труба квадратного сечения 40x40 мм, в которой при помощи 4 дистанцирующих решеток удерживается 9 вертикально расположенных стержней диаметром 9,1 мм. В нижней части канала установлен газовый дистрибьютор, подающий пузырьки в поток жидкости. Эксперимент проводился при числах Рейнольдса 4000-11000 и расходном газосодержании β = 0-10%.

Для исследования теплообмена изготовлен участок, представляющий собой тонкостенную трубку из нержавеющей стали к внутренней поверхности которой плотно прижат платиновый резистивный датчик температуры. Трубка может смещаться вверх и вниз, изменяя расстояние от датчика до дистанцирующей решетки. С помощью медных трубок к участку подводится электрический ток. Зная подводимую к рабочему участку мощность и температуру стенки несложно найти коэффициент теплообмена $\alpha = q/\Delta T$.

Измерение напряжения трения и пульсаций напряжения трения на стенке центрального стержня проводились электродиффузионным методом. Определение гидродинамических характеристик потока данным методом основано на измерении скорости диффузии активных ионов к поверхности электрода-датчика, которая зависит от градиента скорости потока жидкости на поверхности датчика. Данный метод позволяет исследовать гидродинамику пристенной зоны каналов, при этом, не внося никаких возмущений в поток жидкости. В качестве рабочей жидкости использовался специальный электролит, состоящий из водного раствора феррии ферроцианида калия ($K_3Fe(CN)_6$ и $K_4Fe(CN)_6$) и карбоната натрия (Na_2CO_3).

Локальное газосодержание измерялось миниатюрным датчиком скорости типа «лобовая точка». Датчик представлял собой проволочку диаметром 50 мкм, покрытую изоляцией. Чувствительным элементом датчика являлся торец проволоки не покрытый изоляцией. Через отверстие в угловом или боковом стержне сборки под углом 15° датчик подавался в рабочий канал. Такой способ ввода датчика в канал позволил провести измерения вблизи стенок стержней и в узких зазорах между ними.

Эксперименты показали существенную неравномерность распределения газовой фазы по сечению канала, значительное влияние газовой фазы на гидродинамику и теплообмен в потоке по сравнению с однофазным течением. Показано, что вклад газовой фазы в интенсификацию теплообмена возрастает при увеличении газосодержания, уменьшении числа Рейнолдса и увеличении расстояния до дистанцирующей решетки. Примечательно, что при больших числах Рейнольдса, интенсивность теплообмена не стремится к значению в однофазном потоке, а больше него на 20 – 30%. Зависимость напряжения трения и пульсаций напряжения трения от расстояния до дистанцирующей решетки имеет немонотонный вид в отличие случая однофазного потока.

Полученные результаты могут быть использованы для валидации расчетных кодов.

Список литературы

1. Kumamaru H., Kondo M., Murata H., Kukita Y. Void-fraction distribution under high-pressure boil-off conditions in rod bundle geometry // Nuclear Engineering and Design. 1994. V. 150. P. 95–105.
2. Yun B., Park G., J. Julia E, Hibiki T. Flow Structure of Subcooled Boiling Water Flow in a Subchannel of 3*3 Rod Bundles // J. of Nuclear Science and Technology. 2008. V. 45. No. 5. P. 402–422.
3. Yang X., Schlegel J.P., Liu Y., Paranjape S., Hibiki T., Ishii M. Measurement and modeling of two-phase flow parameters in scaled 8x8 BWR rod bundle // Int. J. Heat and Fluid Flow. 2012. V. 34. P. 85–97.
4. Hosokawa Sh., Hayashi K., Tomiyama A. Void distribution and bubble motion in bubbly flows in a 4×4 rod bundle. Part I: Experiments // J. Nuclear Science and Technology. 2014. 51. P. 220–230.
5. Rena Q., Pana L., Zhoua W., Dub S., Lib Z. Phase distribution characteristics of bubbly flow in 5×5 vertical rod bundles with mixing vane spacer grids // Experimental Thermal and Fluid Science. 2018. V. 96. P. 451–459.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИТ СО РАН, а также при поддержке правительства Новосибирской области и РФФИ в рамках проекта (19-48-543029 р_мол_а).

УДК 621.165.51

ОСНОВНЫЕ ЧИСЛА ПОДОБИЯ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ ПРОЦЕСС ВНУТРИКАНАЛЬНОЙ СЕПАРАЦИИ ВОДЯНОЙ ПЛЕНКИ В ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЯХ ПАРОВЫХ ТУРБИН

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

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва

e-mail: TishchenkoAA@mpei.ru

В работе рассматриваются особенности процессов удаления водяной пленки через сепарационные щели в проточных частях цилиндров низкого давления паровых турбин. Снижение интенсивности эрозионного износа поверхностей рабочих лопаток последних ступеней конденсационных паровых турбин является одной из наиболее важных задач, решаемых при разработке или модернизации проточных частей цилиндров низкого давления. Эта проблема затрагивает как эксплуатационные, так и экономические характеристики турбоагрегата.

В работе рассмотрены основные процессы, влияющие на интенсификацию эрозионного износа. Двухфазная влажно-паровая среда формируется в проточной части в результате термодинамических и кинематических процессов, тесно связанных с аэродинамикой течения рабочего тела. При этом образуется достаточно сложная по своей композиции полидисперсная дискретная жидкая фаза – разброс диаметров капель воды в проточной части, составляет несколько порядков. В эрозионном износе в первую очередь участвуют крупные капли, размером больше 100 мкм. Данная характеристика является расплывчатой и зависит от условий течения влажно-паровой среды в межосевом зазоре последних ступеней паровых турбин. Процесс образования этих частиц жидкой фазы достаточно сложный и он связан с оседанием капель на поверхностях межлопаточных каналов и образованием водяных пленок. Пленка движется по поверхности лопатки под действием отрицательных градиентов давления, касательных напряжений со стороны основного потока и центробежных сил. При этом, по мере ее течения от входной кромки к выходной, она аккумулирует в себе влагу в виде оседающих на ее поверхности капель, которые являются дополнительным источником расхода и удельного импульса для сплошной жидкой среды на поверхности лопатки. Характер оседания капель определяется особенностями кинематики межфазового взаимодействия между основным потоком и сферическими частицами, движущимися в пространстве межлопаточного канала. Сформированная на поверхностях пленка срывается с выходной кромки и разрушается спутным потоком. В результате формируются крупные эрозионно-опасные капли.

Для борьбы с образованием этих частиц жидкой фазы активно используются системы внутриканальной сепарации. Их основная задача – удалить через сепарационную щель, расположенную на поверхности полой сопловой лопатки, водяную пленку. Тем самым предотвратив ее срыв с выходной кромки и последующее формирование эрозионно-опасных капель. В настоящее время остро стоит вопрос о выборе формы сепарационной щели и ее режимов работы, которые обеспечивают максимальную эффективность удаления водяной пленки при минимальном аэродинамическом воздействии на основной поток. Основная проблема, возникающая при решении этой задачи, заключается в сложности проведения исследований по данному вопросу. Натурные испытания на полномасштабных турбинах не позволяют детально рассмотреть процесс работы системы влагоудаления, особенно для различных форм сепарационных щелей. Проведение исследований на экспериментальных стендах для отдельных отмасштабированных элементов проточных частей турбомашин позволяет решить данную проблему. Однако, необходимо учитывать, что условия формирования и движения водяной пленки в этом случае существенно отличаются от тех, что имеют место в турбине. Важнейшим критерием корректного проведения исследования является «переносимость» на реальную машину основных характеристик эффективности сепарационных щелей – отношение расходов сепарируемой пленки к расходу жидкой фазы в зоне работы щели, а также отношение расхода сепарируемого пара к расходу пара в зоне работы щели. Для организации подобных условий необходимо обеспечить соблюдение основных чисел подобия, которые характеризуют картину течения вблизи сепарационной щели. В настоящей работе приводится анализ этих безразмерных критериев.

Исследования показали, что процесс влагоудаления определяют толщина пленки и ее скорость перед щелью, угол отклонения кромки сепарационной щели от угла направления вектора скорости жидкости, перепад давления на сепарационную щель, ее ширина, скорость и плотность основного потока вблизи сечения щели. Выделено 4 группы безразмерных чисел подобия, которые, так или иначе влияют на описанные выше характеристики – геометрические, режимные параметры течения, параметры, характеризующие межфазовое взаимодействие между паром и каплями жидкости, параметры, определяющие процесс удаления водяной пленки.

Проанализировано влияние различных чисел подобия на интегральные характеристики эффективности сепарационных щелей. Установлено, что при невозможности соблюдения в лабораторных условиях дисперсного состава жидкой фазы, соответствующего реальной турбине, необходимо обеспечить идентичность интенсивности оседания капель на поверхность лопатки.

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

УДК 621.165.51

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВНУТРИКАНАЛЬНОЙ СЕПАРАЦИИ В СОПЛОВОЙ ТУРБИННОЙ РЕШЕТКЕ

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

[1] ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

e-mail: PopovVitV@mpei.ru

Генерация дешевой электроэнергии является одним из основных факторов, позволяющих обеспечить экономический рост и повысить конкурентоспособность предприятий. Для снижения стоимости производства электричества требуется, в том числе, создание турбоагрегатов с высокими технико-экономическими характеристиками. Значительная часть генерирующих мощностей современных отечественных электростанций приходится на паровые турбины. Наличие жидкой фазы в их проточных частях приводит к эрозионному износу и существенному снижению эффективности и надежности работы.

При движении влажного пара в межлопаточных каналах турбинных ступеней на поверхностях лопаток образуется жидкая плёнка. Срываясь в поток, она формирует крупные капли жидкости. Именно эта влага вносит основной вклад в ухудшение условий работы лопаточного аппарата и приводит к его разрушению.

В настоящее время для решения проблем, связанных с присутствием влаги в отсеках турбомашин, достаточно широко применяется внутриканальная сепарация. Данный способ позволяет удалить жидкую пленку с поверхностей межлопаточного канала, уменьшив количество генерируемых крупных эрозионно-опасных капель. К текущему моменту накоплен достаточно большой объем исследований, позволяющих говорить об эффективности внутриканального влагоудаления в борьбе с эрозионным износом лопаточного аппарата.

Использование современных методов лазерной диагностики для исследования потоков влажного пара дало возможность изучить влияние внутриканальной сепарации влаги на структуру потока за решеткой. В работе [1] была проведена оценка воздействия системы влагоудаления на частицы жидкости, движущиеся в кромочном капельном следе, с помощью метода PIV. Развитие этого исследования с применением метода PTV, позволяющего более подробно изучить движение капель в потоке за решеткой, в [2] позволило однозначно установить снижение доли крупной эрозионно-опасной влаги за счет работы системы внутриканальной сепарации с удалением жидкой плёнки с поверхности межлопаточного канала.

Не смотря на большое количество опубликованных результатов исследований по проблемам внутриканального влагоудаления многие вопросы остаются открытыми. В первую очередь для проектирования эффективных систем борьбы с эрозионным износом в проточных частях турбомашин на основе метода внутриканальной сепарации требуется информация о расходах, удаляемых из проточной части влаги и пара. На эти величины оказывают большое влияние как режим работы и конструкция системы удаления влаги, так и начальные и режимные параметры турбинной ступени.

В настоящей работе приведены результаты экспериментального исследования внутриканальной сепарации в плоском пакете сопловых турбинных лопаток с системой внутриканальной сепарации. Две щели для сепарации жидкой плёнки из межлопаточного канала располагались последовательно на вогнутой поверхности сопловой лопатки. Эксперименты проводились при значениях начальной влажности пара y_0 от 3 % до 9,5 % и теоретических значениях числа Маха за решеткой M_{1t} от 0,6 до 0,8. Режим работы системы влагоудаления определялся относительным перепадом давления на сепарационных щелях и менялся в широком диапазоне. Измерения проводились как при одновременной, так и при одиночной работе последовательно расположенных влагоудаляющих сепарационных щелей.

Используемая в ходе экспериментов система измерений позволила раздельно определить расходы удаляемых из межлопаточного канала пара и жидкости. Полученные в результате интегральные характеристики дали возможность оценить влияние различных факторов на эффективность работы системы внутриканальной сепарации.

Выявлено снижение эффективности влагоудаления при одновременной работе сепарационных щелей в диапазоне начальных влажностей пара от 3 % до 6,5 %. Получены зависимости расходов, удаляемых из потока пара и жидкости, от относительного перепада давлений на сепарационную щель.

На основе анализа результатов исследования сформулированы рекомендации по проектированию систем внутриканального влагоудаления. Определен наиболее эффективный диапазон режимов работы сепарационных щелей. Показана целесообразность применения нескольких последовательно расположенных щелей в условиях высокой влажности.

Список литературы

1. Gribin V.G., Tishchenko A.A., Gavrilov I.Yu., et. al. Experimental study of intrachannel separation in a flat nozzle turbine blade assembly with wet stream flow // Power Technology and Engineering. 2016. V. 50. No. 2. P. 180–187.
2. Alekseev R.A., Gribin V.G., Tishchenko A.A., et. al. Investigation of the influence of intra-channel liquid film suction on the structure of the droplet flow downstream a stator blades cascade of a steam turbine // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1359 (1). 012024 p.

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

УДК 532.72

ДИНАМИКА ГАЗОВОГО ПУЗЫРЬКА ПРИ ЛИНЕЙНОЙ ДЕКОМПРЕССИИ ЖИДКОСТИ

Давыдов М.Н.[1,3], Чернов А.А.[2,3], Пильник А.А.[2,3]

[1] Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск
[2] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
[3] Новосибирский государственный университет

e-mail: davydov@hydro.nsc.ru

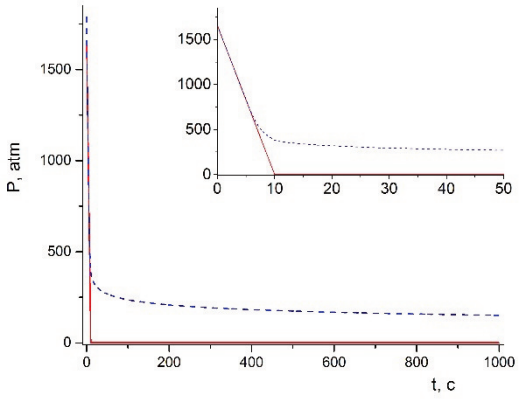
Динамика газового пузырька в высоковязкой газонасыщенной жидкости сопровождается различными эффектами. Так в частности декомпрессия жидкости приводит к диффузии растворенного газа в пузырек и формированию вокруг пузырька некоторого распределения концентрации, вязкости, давления, и других параметров, что в свою очередь влияет на динамику самого пузырька.

В докладе представлены результаты численного исследования динамики газового пузырька в жидкости при линейной декомпрессии последней от p_i до p_f за промежуток времени t_d.

Происходящие при декомпрессии процессы описываются системой уравнений, включающей в себя: уравнение диффузии газа из среды, уравнение динамики массы в пузырьке и уравнение Релея-Плессета динамики пузырька с эффективной вязкостью.

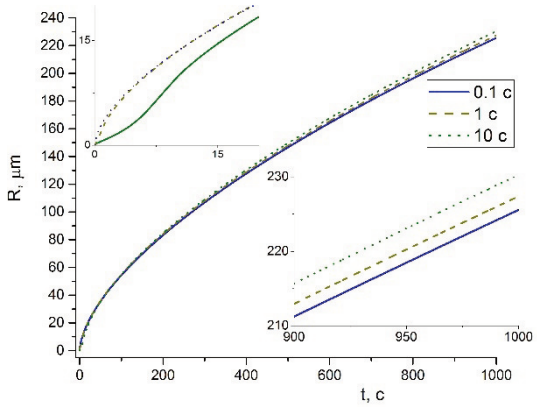
В процессе диффузии газа вокруг пузырька формируется узкий слой, в котором и происходит дегазация, что приводит к соответствующему росту вязкости. Численное моделирование показывает что граница данного слоя движется вместе с ростом пузырька и находится от него на расстоянии приблизительно 10R, то есть динамика слоя носит автомодельных характер, что коррелирует с результатами полученными ранее для случая мгновенной декомпрессии.

В качестве примера представлены результаты численного исследования декомпрессии магматического расплава от начального p_i=1800 атм до атмосферного закону для трех моментов времени t_d=0.1с, 1с и 10с. Общее время расчёта во всех случаях составляло 1000с.



Динамика давления в среде и пузырьке для t_d=10с показана на рисунке. Видно, что при декомпрессии с начального давления и до примерно 500 атм ситуация остаётся равновесной, давления в жидкости и пузырьке одинаковы. Далее, несмотря на продолжающееся падение внешнего давления, в пузырьке динамика давления меняется, быстрое падение сменяется медленным уменьшением. Связано это, естественно, с ростом вязкости вблизи пузырька, которая сильно замедляет его рост. Происходит переход от экспоненциальной стадии роста пузырька к медленной диффузионной.

Особенности, указанные выше, хорошо заметны на следующем рисунке, где показана динамика пузырька для всех случаев. Так в третьем случае хорошо отделяется экспоненциальная стадия, но она присутствует во всех трех случаях. Имеется и существенная зависимость от скорости декомпрессии: если в начале более быстрая декомпрессия приводит к большему росту пузырька, то в дальнейшем ситуация полностью меняется и максимальный радиус оказывается в случае максимального времени декомпрессии.



Полученный в результате численного исследования эффект скорее всего связан с тем что на границе пузырька условия полагаются равновесными и в случае быстрой декомпрессии пузырёк быстро оказывается в очень вязком окружении. Таким образом меняется динамика диффузии растворённого газа из среды, масса газа в пузырьке оказывается меньше чем в других случаях. Медленная декомпрессия наоборот увеличивает время формирования вокруг пузырька слоя с очень высокой вязкостью, тем самым обеспечивая максимальный в итоге радиус пузырька.

Список литературы

1. Chernov A., Pil'nik A., Davydov M., Ermanyuk E., Pakhomov M. Gas nucleus growth in high-viscosity liquid under strongly non-equilibrium conditions // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018. V. 123. P. 1101–1108.
2. Chernov A. A., Pil'nik A. A., Davydov M. N. Peculiarities of gas bubble growth in magmatic melt under the condition of rapid decompression // Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing. 2019. V. 1382. 012107.

Работа поддержана РФФИ (грант № 19-08-01010)

УДК 536.24

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ В ЩЕЛЕВОМ МИКРОКАНАЛЕ

Дементьев Ю.А.[1,2], Роньшин Ф.В.[1,2], Чиннов Е.А.[1,2]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
[2] Новосибирский государственный университет

e-mail: demyurij@inbox.ru

Использование мини- и микроканалов вместо обычных трубок уже показало свою эффективность в создании теплообменных систем с мини-,микро-, и нанообъектами, а также в таких областях как микроэлектроника и микрофлюидика. Используя микроканальные системы возможно отводить тепловые потоки более 1 кВт/см^2[1]. Двухфазные потоки жидкость-пар или жидкость-газ способны решить данную задачу. К настоящему времени микроканальные испарители с двухфазным потоком являются одним из самых эффективных способов охлаждения для микроэлектронных компонентов с высоким тепловыделением Для эффективного отвода тепла необходимы и актуальны исследования, посвященные характеристикам двухфазного потока в микроканалах, закономерностям и особенностям формирования режимов течений, гидравлическим потерям, а также тепловым характеристикам.

Многие исследовательские группы изучают каналы с круглым, квадратным сечением. Также, в литературе встречаются работы, посвященные каналам серпантинной формы и параллельные каналы квадратного или круглого сечения. Короткие щелевые микроканалы имеют преимущества по сравнению вышеперечисленными микроканалами, которые заключаются в большей площади теплообмена, и компактности в сочетании с минимальным перепадом давления при схожих расходах.

Помимо этого, изучаемые в данной работе щелевой микроканал (прямоугольные каналы с большим отношением ширины к высоте) имеют особую актуальность для создания новых газожидкостных систем охлаждения компонентов 3D-микрочипов из-за их геометрии, поскольку характерные размеры компонентов микрочипов и самих каналов сопоставимы.

Целями данной работы является изучение характеристик двухфазного потока в щелевом мироканале с площадью поперечного сечения 0,05x10 мм^2 таких как капли жидкости, представляющие собой вертикальные жидкостные перемычки, гидравлическое сопротивление, режимы течения и влияние теплового потока на данные характеристики.

Рабочая секция выполнена из двух параллельных оптических пластин толщиной 10 мм, сверху – стекло, снизу – нержавеющая сталь. Расстояние между пластинами задается двумя тефлоновыми прокладками толщиной 50 мкм. Плоскопараллельность и толщина стекла и прокладок строго контролируются. В нижней пластине выполнена сопло, через которое жидкость подается в пространство между пластинами с помощью высокоточного шприцевого насоса. После сборки высота микроканала измеряется в нескольких точках, используя конфокальный метод confocalDT IFC2451. Вставка для сапфирового окна выполнена в нижней пластине. На сапфировое стекло напылен ITO нагреватель, контактные площадки для припаивания проводов выведены на противоположную сторону сапфирового окна при помощи серебряного напыления. Таким образом, нагреватель находится внутри микроканала, а питание для нагрева подводится снаружи. Все проводящие элементы покрыты диэлектрическим лаком для экранирования от корпуса микроканала. К серебряным поверхностям на сапфировом стекле припаяны контакты при помощи индиевого припоя. Данные припой обладает хорошей адгезией и не требует высокой температуры поверхности (сапфира). Исследование тепломассобмена проводится при помощи шлирен- и ИК методов.

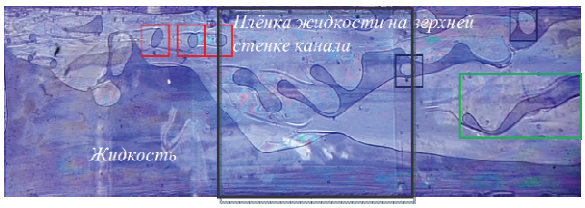


Рис.1 Вспененный режим в канале 0,05x10 мм^2. Красным указаны капли, синим – пузырьки, зеленым – разорванные жидкостные перемычки, чёрным – зона нагревателя.

С помощью шлирен-системы визуализированы следующие режимы течений: струйный, вспененный, кольцевой [2]. По полученным данным создана карта режимов течения. Затем было проведено исследование влияния теплового потока на двухфазное течение в микроканале. В качестве жидкости использовалась FC-72, а в качестве газа – азот. Исследования проводились при достаточно высоких скоростях потока газа Qg = 20 – 200 мл/мин и жидкости Qg = 6 – 10 мл/мин, когда нагреватель всегда смочен. Мощность нагрева варьировалась от 0 до 20 Вт.

Список литературы

1. Bar-Cohen, A. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2017. V. 7. P. 120.
2. Ronshin, F.V., Cheverda, V.V., Chinnov, E.A., & Kabov, O.A. Technical Physics Letters. 2018. V. 44 (4). P. 305–308.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (соглашение №18-19-00407)

УДК 536.24

ЛЕВИТАЦИЯ УПОРЯДОЧЕННОГО МАССИВА ИЗ МИКРОКАПЕЛЬ НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ НАГРЕТОЙ ЖИДКОСТИ

Зайцев Д.В.[1,2], Шатекова А.И.[1,2]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
[2] Новосибирский государственный университет

e-mail: zaitsev@itp.nsc.ru

Известно, что при нагреве жидкости над ее поверхностью образуется двумерный массив – упорядоченная структура из левитирующих микрокапель жидкости (Рис.1). Левитирующие микрокапли можно применять для визуализации микромасштабных потоков в парогазовой среде в непосредственной близости от границы раздела жидкость-пар/газ, где затруднительно или невозможно применять традиционные методы PIV [1].

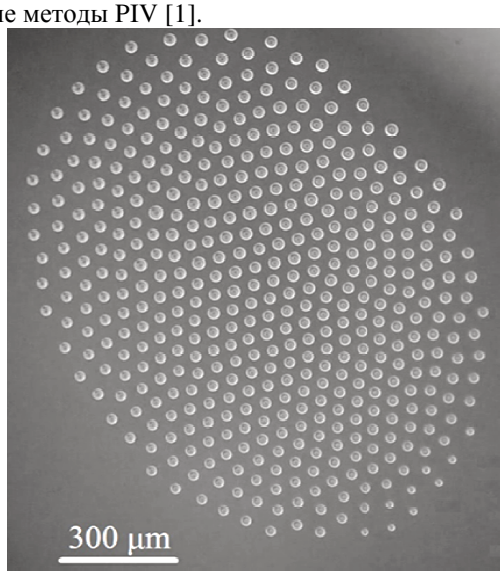


Рис.1. Массив из левитирующих микрокапель воды. Температура подложки 67 ℃, толщина слоя воды 0,5 мм.

В работах [2, 3] разработана модель, предсказывающая высоту левитации капель, которая имеет хорошее согласие с экспериментальными данными. Целью данного экспериментального исследования является определение зависимости расстояния между микрокаплями от размера и количества капель в двумерном.

На рис.2. представлена зависимость среднего расстояния между центрами капель L от диаметра капель в массиве d. Как видно из графика, L увеличивается с увеличением d, как $L \sim d^{0,5}$, но практически не зависит от количества капель в диапазоне N =2-29 и температуры подложки в диапазоне Tw=66°-79,8 °C.

На основе зависимости $L \sim d^{0,5}$ было построено безразмерное соотношение (безразмерное расстояние между каплями), в котором в качестве масштаба используется d_{max} – максимальный размер микрокапель для данной температуры. На рис.3. представлена зависимость данного безразмерного соотношения от количества капель. Как видно из графика, безразмерное расстояние между каплями слабо изменяется в диапазоне N от 2 до около 7 и составляет примерно 2,9. При N > 7 расстояние начинает уменьшаться с увеличением количества капель в массиве.

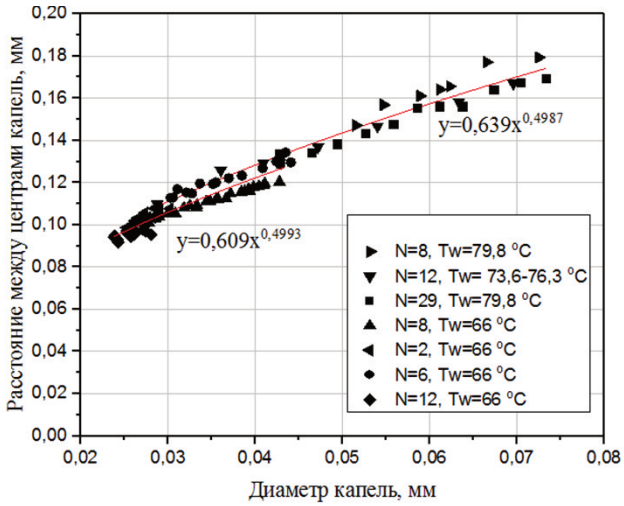


Рис.2. Зависимость расстояния между центрами капель от диаметра капель. Толщина слоя жидкости под массивом 0,5 мм. В легенде указано количество капель в массиве и температура подложки.

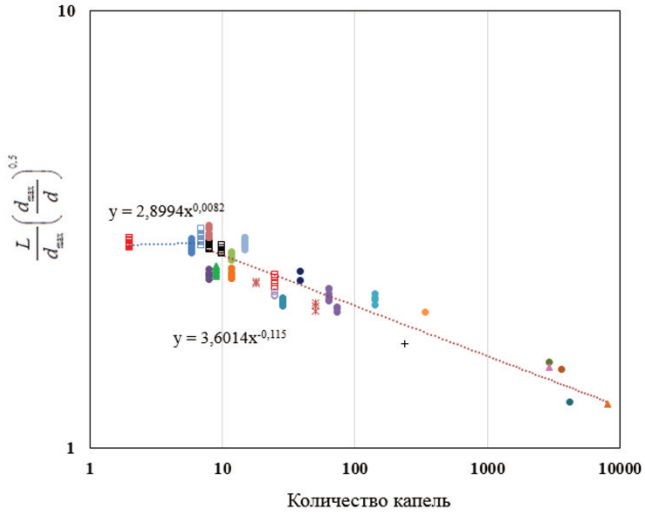


Рис.3. Зависимость безразмерного расстояния между каплями от количества капель в массиве для различных размеров нагревателя и различных температур подложки.

Список литературы

1. Kabov O.A., Zaitsev D.V., Kirichenko D.P., Ajaev V.S. Interaction of levitating microdroplets with moist air flow in the contact line region // Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering. 2017. V. 21. No. 2. P. 60–69.
2. Zaitsev D., Kirichenko D., Ajaev V., Kabov O. Levitation and selforganization of liquid microdroplets over dry heated substrate // Physical Review Letters. 2017. V. 119. No. 119. P. 094503.
3. Zaitsev D.V., Kirichenko D.P., Shatekova A.I., Ajaev V.S., Kabov O.A. Experimental and theoretical studies of ordered arrays of microdroplets levitating over liquid and solid surfaces // Interfacial Phenomena and Heat Transfer. 2018. V. 6(3). P. 219–230.

УДК 531.533

ОСОБЕННОСТИ ДИАГНОСТИКИ ДИСПЕРСИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАСПЫЛОВ ПЕРЕГРЕТОЙ ВОДЫ В КОНФУЗОРНО-ДИФФУЗОРНЫХ СОПЛАХ, ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Залкинд В.И., Зейгарник Ю.А., Низовский В.Л., Низовский Л.В., Щигель С.С.

Объединённый институт высоких температур РАН, Москва

e-mail: levmobile@mail.ru

Высокодисперсные распылы перегретой воды и других жидкостей могут применяться (и уже применяются) для интенсификации тепло- и массообмена в энергетике и объектах новой техники. Анализ экспериментов, проведенных при различных видах сопел, показывает, что оптимальным вариантом для достижения наиболее высокодисперсных факелов распыла при T_0 на уровне 240^{O}C и выше является распыл с применением конфузорно-диффузорных сопел. Расчетный анализ течения перегретой воды в таких соплах и при указанных перегревах воды, показал, что главным процессом, приводящим к высокотонкому распылу, является быстрое («взрывное») вскипание метастабильной воды. Оно происходит в диффузоре вблизи горловины сопла с последующим, также весьма быстрым преобразованием вспененной паром жидкости в двухфазный паро-капельный поток и в результате определяет достижение полученной в опытах значительной доли капель субмикронной моды. Второй особенностью таких факелов распыла является высокая концентрация капель и, как следствие – высокая оптическая плотность факела распыла. В результате имеет место существенное ослабление при прохождении через них как луча диагностического лазера, так и рассеянного излучения на его пути к приемнику, а также их заметное вторичное и многократное рассеяние. Этот эффект, снижающий точность измерения индикатрис рассеяния, требует при использовании рассматриваемых типов сопел особого изучения. В связи с этим были проведены измерения коэффициентов ослабления первичного излучения лазера и их анализ. Полученные в опытах значения коэффициентов ослабления (К) составляют для T_0 = 240^{O}C около $K_0 \cong 40$ при длине прохождения луча через объем факела 30мм и $K_0 \cong 3.5$ при длине 10мм. Это на порядок больше, чем измеренные K_0 на коротких суживающихся соплах с малой концентрацией капель в факелах распыла, где значения K_0 составляли 2,8-3,0 [1]. На основании закона Бугера-Ламберта и с учетом массовых расходов жидкой фазы в факелах распыла, их диаметров и скоростей потока была проведена сравнительная оценка массовой доли микронных капель, рассеяние от которых при малых углах согласно теории Ми существенно выше, чем от субмикронных капель. Это позволило подтвердить долю микронных капель, полученную при ее расчете через индикатрисы рассеяния [2]. Проведено сравнение расчетов [2] с расчетами с иным (не содержащим понятия фактора гетерогенности) описанием гетерогенной нуклеации [3] при распылении перегретой воды в конфузорно-диффузорных соплах. Кроме того, проведено уточнение предложенного в [2] критерия перехода к определяющей роли нуклеобразования в процессе диспергирования перегретой метастабильной жидкости. Для нуклида критического радиуса было рассмотрено соотношение энергии поверхностного натяжения к энергии, обусловленной химическим потенциалом фазового перехода с учетом поправки Томсона. Поправка Томсона связана с отличием процесса испарения внутрь сферического пузырька от испарения на плоской поверхности [4]. При этом кривая равновесия сдвигается на величину данной поправки и слегка деформируется из-за изменяемости констант с температурой.

Список литературы

1. Zalkind V.I., Zeigarnic Yu. A., Marinichev D.V., Nizovskiy V.L., Nizovskiy L.V., Oxman A.A. Measurrment of droplet size distribution in air- droplet flow of atomized superheated water. The 5-th Russian National Heat Transfer Conference, (РНКТ-5), October 25-29, 2010. Moscow. V. 5. P. 168–171.
2. V I Zalkind, Yu A Zeigarnik, V L Nizovskiy, L V Nizovskiy, S S Schigel /"Some peculiarities of superheated water flow in contracting-expanding nozzles and their influence on droplet dimension distribution in atomized water plume"/ Journal of Phisics Conferences series. 2019. V. 1359. P. 012034.
3. Кумзерова Е.Ю. / Численное исследование образования и роста пузырей пара в условиях падения давления жидкости Диссертация на соискание уч. степени к.ф.м.н / Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН. Санкт-Петербург. 2004.
4. Гухман А.А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепло-массобмена. М.: Высшая школа. 1974. 328 с.

Работа поддержана РФФИ, Грант № 19–08-00504.

УДК 621.9

МЕТОДЫ РАСЧЕТА КРИТИЧЕСКОГО ТЕПЛОВОГО ПОТОКА ПРИ КИПЕНИИ R125 В МИЛЛИМЕТРОВОМ КАНАЛЕ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

Заноско А.И., Дедов А.В., Беляев А.В.

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

e-mail: zanoskoai@gmail.com

В докладе представлена работа, посвящённая экспериментальному исследованию кризиса теплообмена в вынужденном потоке кипящего фреона R125 в канале диаметром 1 мм при высоких приведенных давлениях. В настоящее время в высокоэффективной энергетике в качестве рабочего вещества предлагается использование различных хладонов и CO2 в сжиженном состоянии. Необходимы универсальные и апробированные методы расчета теплообмена и предельных тепловых нагрузок при кипении подобных веществ в новых энергоэффективных аппаратах. В современной технике продолжают активно развиваться и внедряться высокоэффективные теплообменные устройства с охлаждающими миниканалами, в которых в качестве теплоносителя могут использоваться различные фреоны.

Целью работы является получение систематизированного набора экспериментальных данных о критическом тепловом потоке при течении хладона R125 в круглом миниканале в условиях высоких приведенных давлений, на основании которого будут апробированы и отобраны наиболее подходящие известные методики расчета кризиса теплообмена.

В докладе представлено описание экспериментального стенда и показаны опытные данные о критическом тепловом потоке. Для обобщения данных были отобраны наиболее известные в литературе методы расчета, такие как [1-9]. Пример обобщения данных с помощью [1, 2] показан на рис. 1.

На стенде выполнялись экспериментальные исследования гидродинамики и теплообмена при вынужденном течении фреона R125 в вертикальном миллиметровом канале длиною 100 мм. Гидравлический контур стенда позволяет поддерживать стабильные параметры потока на входе рабочего участка при давлениях до 2.5 МПа. Запланированные эксперименты имеют следующие параметры потока: массовый расход теплоносителя 500 – 1000 кг/м^{2}с, давление по отношению к критическому 0.4 – 0.7; с помощью предварительного подогревателя на входе в рабочий участок устанавливается различная степень насыщения жидкости, соответствующая недогретой и насыщенной жидкости. Измерения выполняются с помощью автоматизированной системы сбора данных, которая позволяет уверенно фиксировать кризис теплообмена.

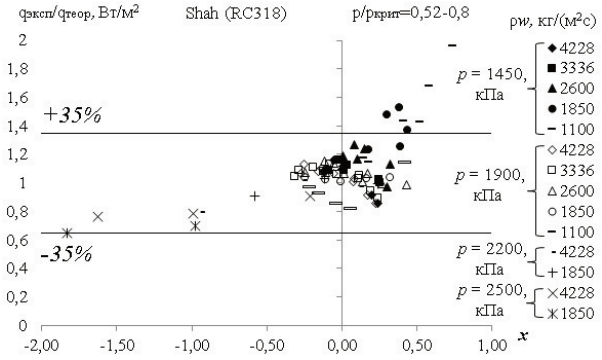


Рис. 1. Пример обобщения экспериментальных данных.

Список литературы

1. Shah M.M. Improved general correlation for critical heat flux during upflow in uniformly heated vertical tubes, Int. J. Heat Fluid Flow 1987. V. 8 (4). P. 326–335.
2. Shah M.M. A generalized graphical method for predicting CHF in uniformly heated vertical tubes, Int. J. Heat Mass Transfer. 1979. V. 22. P. 557–568.
3. Zhang W., Hibiki T., Mishima K., Mi Y. Correlation for critical heat flux for flow boiling of water in mini-channels, Int. J. Heat Mass Transfer. 2006. V. 49. P. 1058–1072.
4. Zhang Q., Xu W. Flow boiling of liquid nitrogen in micro-tubes Part II – Heat transfer characteristics and critical heat flux. 2007.
5. Wojtan L., Revellin R., Thome J.R. Investigation of critical heat flux in single, uniformly heated microchannels, Exp. Therm. Fluid Sci. 2006. V. 30. P. 765–774.
6. Kuan W.V. Experimental study of flow boiling heat transfer and critical heat flux in microchannels, Ph.D. Thesis, Rochester Institute of Technoloy. 2006.
7. Katto Y. A generalized correlation of critical heat flux for the forced convection boiling in vertical uniformly heated round tubes, Int. J. Heat Mass Transfer. 1978. V. 21, P. 1527–1542.
8. Ягов В.В. Теплообмен при развитом пузырьковом кипении жидкостей // Теплоэнергетика. 1988. № 2. С. 4–9.
9. Ягов В.В., Пузин В.А. Приближенная физическая модель кризиса кипения при вынужденном движении насыщенной жидкости // Теплоэнергетика. 1985. № 3. С. 3–5.

РФФИ (грант № 16-08-00806)

УДК 536.2

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАСПЛАВА И ОХЛАДИТЕЛЯ ПОСРЕДСТВОМ МАЛОМАСШТАБНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ТВЕРДЫМИ И ЖИДКИМИ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ОБРАЗЦАМИ

Ивочкин Ю.П.[1], Исмаилов А.М.[1,2], Кубриков К.Г.[1], Тепляков И.О.[1]

[1] Объединенный институт высоких температур РАН, Москва
[2] Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

e-mail: vortex@iht.mpei.ac.ru, iamdontsmoke1998@mail.ru

Несмотря на более чем полувековое активное изучение паровых взрывов, детальные особенности протекания этого сложного и опасного явления изучены недостаточно полно. В частности, по нашему мнению, остается открытым вопрос о возможных причинах фрагментации горячего расплава при его взаимодействии с низкокипящим теплоносителем. Процесс фрагментации играет определяющую роль при паровом взрыве, поскольку именно он приводит к резкому увеличению поверхности теплообмена и парообразования. В типовой схеме протекания паровых взрывов предполагается, что интенсивное дробление теплоносителя происходит на трех этапах, связанных с распадом жидкометаллической струи, спонтанным дроблением отдельной капли и измельчением группы капель ударными волнами.

Представленное исследование посвящено, в частности, проверке достоверности предложенных ранее возможных механизмов фрагментации во втором упомянутом выше случае, то есть в условиях падения одиночных перегретых капель в охладитель (т.н. мелкомасштабный паровой взрыв). В докладе проанализированы большинство описанных в литературе гипотез фрагментации, наиболее популярные из которых основаны на эффектах, связанных с возникновением термических напряжений при быстром разрушении паровой оболочки и образованием струй охладителя, бьющих и разрушающих каплю. Следует, на наш взгляд, также выделить две оригинальные подтвержденные гипотезы, связанные с возникновением кавитации вследствие существования волн разрежения внутри капли, а также поэтапным дроблением жидкометаллической поверхности при образовании на ней паровых пузырьков охладителя.

Фрагментация при паровом взрыве непосредственно связана с кризисом пленочного кипения недогретой жидкости. Поэтому, помимо экспериментов по дроблению жидкометаллических капель, также были выполнены опыты по изучению пленочного кипения на твердых образцах различной формы. В экспериментах с жидкометаллическими каплями, падающими в холодную воду, твердотельные металлические заготовки плавились либо в подвешенном (левитирующем) состоянии с помощью индукционного нагрева, либо в тигле электропечи сопротивления. При проведении опытов по изучению пленочного кипения на твердых поверхностях предварительно нагретые образцы сферической и полусферической формы были неподвижны относительно охлаждающей жидкости. В опытах велась видеосъемка происходящих процессов, а также измерялись: температуры образцов и охладителя – воды, недогретой до температуры насыщения; импульсы давления, сопровождающие взрывное разрушение паровых оболочек.

Результаты проведенных опытов свидетельствуют, что все упомянутые выше гипотезы фрагментации имеют под собой экспериментальное обоснование. С помощью термомеханических гипотез, учитывающих затвердевание поверхностного слоя, можно объяснить образование жидкометаллических струй, вытекающих из капли. Однако, подобный процесс имеет миллисекундный временной масштаб и не позволяет объяснить взрывную фрагментацию капли. По поводу проникающих струй и основанной на них гипотезы следует заметить, что в литературе распространено мнение об отсутствии этого явление. Тем не менее, как показали проведенные эксперименты по коллапсу паровых оболочек на перегретых полусферических образцах, подобный эффект может иметь место. Также было установлено, что коллапс паровых оболочек способен генерировать внутри жидкометаллической капли отрицательные импульсы давления амплитудой десятка атмосфер и длительностью несколько микросекунд. Эти значения не позволяют надеяться на возникновение кавитации внутри жидких металлов без учета растворенных в них газов, влияние которых требует дальнейшего более детального исследования. Гипотеза о тонкой фрагментации расплава вследствие деформации его поверхности при росте паровых пузырей охладителя также имеет под собой эмпирическое и расчетное обоснование. В опытах по фрагментации наблюдаются выбросы мелких металлических капель, а результаты расчетов свидетельствуют, что время распада всей капли соответствует экспериментальным данным (десятки микросекунд).

Проведенный рентгеноструктурный анализ осколков дробления позволил установить, что в процессе тонкой фрагментации расплава его структура приобретает аморфный характер. Последнее обстоятельство подтверждает возможность развития на основе этого метода технологии получения различных аморфных материалов с особыми свойствами.

Работа поддержана РФФИ (грант № 18-08-01497)

УДК 536.524

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ИМПАКТНОМ НАТЕКАНИИ ОДИНОЧНОГО ИМПУЛЬСА СПРЕЯ РАЗЛИЧНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

Карпов П.Н., Назаров А.Д., Серов А.Ф., Терехов В.И.

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

e-mail: Flags712008@yandex.ru

Метод охлаждения теплонапряженных поверхностей с помощью газокапельного спрея является одним из наиболее эффективных, и он позволяет снимать значительные тепловые потоки [1] при относительно малых расходах жидкой фазы. Большинство экспериментальных и численных исследований в области газокапельного охлаждения посвящено изучению спреев, формируемых одиночным соплом [1-2]. В большом числе технических приложений требуется охлаждать поверхности большой площади. В этом случае наиболее приемлемым является использование многосопловых источников спрея. Для однофазных режимов такой способ охлаждения изучен достаточно основательно, тогда как для двухфазных газокапельных струй проблема теплообмена при натекании системы струй получила развитие только в последнее время.

В настоящей работе представлены результаты изучения поведения мгновенного коэффициента теплоотдачи при подаче одиночного импульса различной длительности.

Экспериментальная установка состоит из двух основных блоков: источника многоструйного импульсного потока и теплообменника с соответствующими системами сбора и обработки экспериментальной информации [3]. На плоской части источника расположены 16 жидкостных форсунок и 25 воздушных сопел. Давление жидкости на входе блока форсунок могло изменяться в широких пределах P_0 = 0.05 ÷ 0.6 MPa. В течение одного эксперимента оно поддерживалось постоянным.

Продолжительность фазы повышенного теплообмена, в течение которой завершаются испарительные процессы на стенке, как правило, не превышает 100 мс. После этого теплоотдача стабилизируется по времени и ее величина соответствует примерно значению в лобовой точке импактных однофазных струй. Очевидно, что следующий импульс спрея целесообразно подавать по окончанию этого периода, когда теплообменная поверхность освобождается от жидкой фазы.

Экспериментальное исследование интенсивности теплообмена при взаимодействии одиночного импульса спрея с теплообменной поверхностью в режиме испарительного охлаждения (T_w = 70°C) показало, что характер изменения коэффициента теплоотдачи во времени зависит, прежде всего, от длительности импульса $t_{имп}$ (см. рис.1). Для коротких по времени импульсов ($t_{имп}$ < 10 мс) в распределении формируется один максимум, а для более длительных наблюдаются два ярко выраженных экстремума. Возможной причиной второго максимума является возврат и повторное осаждение крупных капель, отраженных от поверхности.

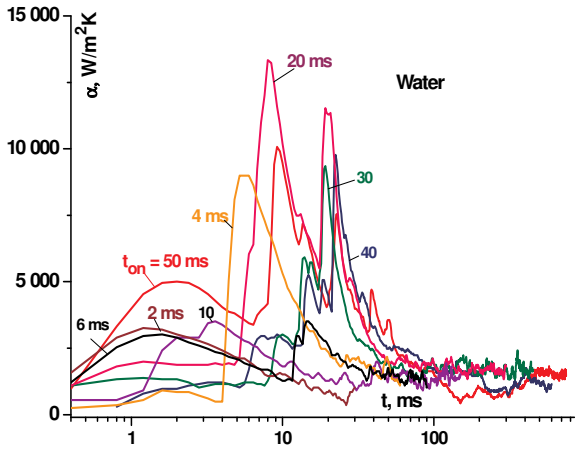


Рис. 1. Изменение коэффициента теплоотдачи во времени при импактном натекании одиночного газокапельного импульса различной продолжительности, P_0 -0,2 MPa

Максимальные и осредненные по времени коэффициенты теплоотдачи сильно зависят от длительности импульса. Они достигают наибольших значений при $t_{имп} \approx 10$ мс и, несмотря на увеличение массы инжектируемой жидкой фазы по мере роста длительности импульса, коэффициент теплоотдачи при $t_{имп} > 10$ мс изменяется очень слабо.

Список литературы

1. Zhou N., Chen F., Cao Y., Chen M., Wang Y. Experimental investigation on the performance of a water spray cooling system. Applied Thermal Engineering. 2017. V. 112. P. 1117–1128.
2. Pakhomov M.A., Terekhov V.I. The effect of confinement on the flow and turbulent heat transfer in a mist impinging jet. Int. J. Heat and Mass Transfer. 2011. V. 54. P. 4266–4274.
3. Nazarov A. D., Serov A. F., Bodrov M. V. Intensification of Cooling by a Pulsed Gas–Droplet Flow: Equipment, Parameters and Results. Technical Physics. 2010. V. 55. P. 724–727.
4. Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Yu., Mityakov A.V., Terekhov V.I., Kalinina S.V., Lemanov V.V. Testing and Using of Gradient Heat Flux Sensors. Heat Transfer Research. 2008. V. 39. P. 625–626.

Работа поддержана РФФИ (грант № 18-48-543017)

УДК 536.4.033

ДИНАМИКА ВЗРЫВНОГО КИПЕНИЯ СМЕСЕВЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА МИКРОНАГРЕВАТЕЛЕ

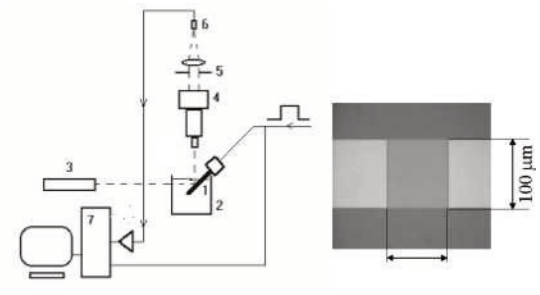
Козулин И.А.[2], Барткус Г.В.[1,2], Кузнецов В.В.[1,2]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
[2] Новосибирский государственный университет

e-mail: vladkuz@itp.nsc.ru

Применение микроэлектромеханических систем (МЭМС), основанных на взрывном кипении жидкости, в различных областях техники обуславливает необходимость установления физических механизмов и совершенствования методов расчета устройств с размером элементов меньше 100 цм [1]. Несмотря на то, что характеристики взрывного кипения однокомпонентных жидкостей хорошо изучены, присутствие в смеси других компонентов существенно изменяет температуру взрывного фазового перехода и его динамику. В данной работе проведено экспериментальное исследование взрывного кипения систем этанол-вода и ацетон-этанол-вода, компоненты кото¬рых имеют существенно различающиеся критические температуры, на плоском многослойном микронагревателе 100×110 мкм с внешним слоем, образованном карбидом кремния, и наноструктурированном танталовом нагревателе с размером 61×66 мкм.

Схема стенда для исследования взрывного кипения смесевых композиций показана на рис. 1 (а). Фотография микронагревателя с размером 100×110 мкм представлена на рис. 1 (б).



(а) *(б)*

Рис. 1. Схема экспериментального стенда.

В экспериментах многослойный микронагреватель (1) погружался в кювету с жидкостью (2). Начальная температура изменялась от 20 до 23^{0}C. Одиночные прямоугольные импульсы тока подавались на резистор микронагревателя (1) для нагрева жидкости. Для изучения взрывного кипения использована оптическая методика регистрации зародыше- образования, основанная на измерении интенсивности лазерного излучения (3), диффузно отражённого от поверхности нагревателя, с использованием микроскопа (4) и диафрагмы (5). Интенсивность излучения измеряется фотодиодом (6) и быстрым АЦП (7). При возникновении микропузырьков интегральный коэффициент отражения падает, и сигнал с фотоприёмника регистрирует динамику заполнения поверхности нагревателя паровыми пузырьками.

Экспериментально установлены закономерности взрывного кипения двойных и тройных смесей с различной объемной концентрацией спирта и ацетона при высокоэнергетическом воздействии тепловыми импульсами. Определены условия, при которых температура начала взрывного фазового перехода в бинарном и тройном растворе, который не подчиняется в полной мере законам Рауля и Генри, достаточно хорошо соответствует линейной зависимости от мольной концентрации легколетучих компонентов. На рис. 2 приведена зависимость температуры взрывного кипения смеси вода-этанол в зависимости от скорости роста температуры жидкости dT/dt и c0 (концентрация этанола), линиями приведен расчет температуры предельного перегрева по зависимости, полученной на основе данных [3] в приближении линейной зависимости от мольной концентрации легколетучего компонента.

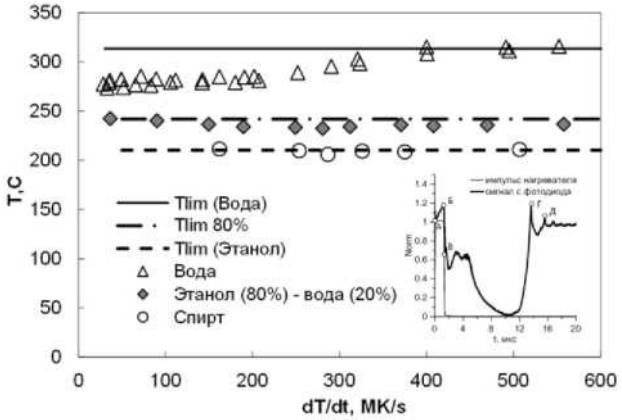


Рис. 2. Температура начала взрывного кипения в зависимости от скорости роста температуры перед началом фазового взрыва для смеси этанол-вода.

На рис. 2 приведена также зависимость нормированной интенсивности отраженного света и тока от времени при взрывном кипении смеси для c0 = 80% и dT/dt=189,7 МК/с (буквами обозначены стадии взрывного кипения). Установлено, что добавка воды приводит к уменьшению длительности начальной стадии кипения (Б-В), что показывает снижение порога взрывного кипения по тепловому потоку.

Список литературы

1. Allen R. R., Meyer J. D. and Knight W. R. Thermodynamics and Hydrodynamics of Thermal Ink Jets // Hewlett-Packard J. 1985. V. 36. P. 21–27.
2. Козулин И. А., Кузнецов В. В., Барткус Г. В. Экспериментальное изучение взрывного вскипания органических жидкостей методом изменения интенсивности лазерного излучения при рассеянии на микропузырьках. Журнал Вестник НГУ. Серия Физика. 2016. Т. 11(1). С. 66–72.
3. Скрипов В. П. Метастабильная жидкость. М.: Наука, 1972. 312 с.

Исследование выполнено в ИТ СО РАН за счет гранта Российского Научного Фонда (проект №16-19-10519-П)

УДК 53.043

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР И СВОЙСТВА РЕКОННЕКТИРУЮЩИХ КВАНТОВЫХ ВИХРЕВЫХ ЛИНИЙ

Кондаурова Л.П.[1,2], Андрющенко А.В.[1]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
[2] Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

e-mail: louisa@ngs.ru

В сверхтекучем гелии при определенных условиях развиваются так называемые квантованные вихревые линии. Именно внутри этих линий и происходит нарушение потенциальности движения сверхтекучего движения. При своем движении этих линии могут реконнектировать. Процессы реконнекции играют важную роль в динамике вихревых линий. Меняется их топология, что приводит к изменению некоторых свойств. Как результат, происходит возмущение температуры, давления жидкости, меняется характер теплопереноса и т.д. Изучение динамики и свойств вихревых линий важно как с точки зрения применения гелия в качестве хладоагента, так и с точки зрения фундаментальной физики.

Ранее нами было проведено численное моделирование динамики вихревых петель в сверхтекучем гелии до и после их реконнекции при различных температурах T = 0 K, T = 1.3 K, T = 1.6 K, T = 1.9 K [1], [2]. Моделирование проводилось в рамках метода вихревой нити с использованием полного уравнения Био–Савара. Показано, что динамика вихревых колец зависит как от начального расположения их, так и от температуры. При реконнекции в зависимости от исходных параметров задачи образовывалось различное количество петель разных размеров, возникали волны Кельвина различной амплитуды, характер затухания которых также был различным, кроме того также разными были скорости движения образованных петель и их отдельных элементов. Общим было то, что зависимость расстояния между ближайшими элементами петель (до реконнекции) и ближайшими элементами образованной вихревой петли (после реконнекции) от времени описывается степенным законом с показателем степени ½.

Далее нами была исследована динамика вихревых петель от момента реконнекции до их коллапса при выше указанных температурах [3]. Полученные результаты показали, что при ненулевых температурах после момента реконнекции диссипация полной кинетической энергии обязана действию силы взаимного трения. Характер диссипации энергии, изменение значения модуля вихревого импульса при всех температурах и начальных условиях имеют универсальные формы. При увеличении температуры мощность диссипации растет. Вблизи абсолютного нуля по принятым на сегодняшний день представлениям диссипация энергии обусловлена каскадом нелинейных волн Кельвина. Однако, при выбранном нами пространственного разрешения не наблюдается каскад волн Кельвина.

Следующим этапом наших исследований является определение энергетического спектра после момента реконнекции. Для его нахождения применяется статистический подход: рассчитывается продольная структурная функция скорости второго порядка. Проведено систематическое исследование определение спектра при различных температурах, начальных расположениях петель и в различные моменты времени. Удивительным фактом оказалось то, что характер спектра почти не зависит от вышеперечисленных параметров. В качестве примера на рис. 1 приведены структурные функции полей скоростей, для вихревых петель при различных температурах.

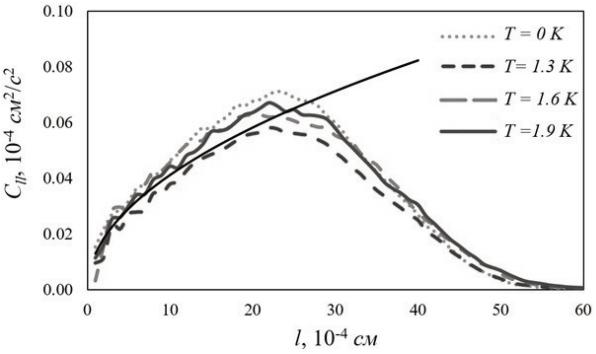


Рис.1. Структурные функции полей скоростей. Угол между начальными плоскостями петель равен π/2, t = 0 с.

Черная сплошная линия – аппроксимирующая кривая ~ $l^{0.5}$, что соответствует спектру (~$k^{-3/2}$). Таким образом, механизм распада вихревых петель, аналогичен механизму распада одиночных гладких вихревых колец, с той лишь разницей, что возникшие при реконнекции возмущения из-за более интенсивного взаимодействия с нормальной компонентой гелия, могут несколько ускорять этот процесс.

Список литературы

1. Andryushchenko V.A., Kondaurova L.P., Nemirovskii S.K. Dynamics of Quantized Vortices Before Reconnection // J. Low Temp. Phys. 2016. V. 183. No. 5/6. P. 377–383.
2. Андрющенко В.А., Кондаурова Л.П. Динамика вихревых петель после реконнекции в сверхтекучем гелии при различных температурах. Low Temperature Physics/Фізика низьких температур. 2018. Т. 44. № 10. С. 1302–1307.
3. Андрющенко В.А., Кондаурова Л.П. Диссипация энергии после однократной реконнекции вихрей в He II при различных температурах // Low Temperature Physics/Фізика низьких температур. 2019. Т. 45. № 8. С. 1053–1060.

Работа поддержана РНФ (грант № 19-19-00321)

УДК 553.9

УЧЕТ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ГЕНЕРАЦИИ УГЛЕВОДОРОДОВ ИЗ МАТРИЦЫ КОЛЛЕКТОРА ПРИ ГИДРОТЕРМОВОЗДЕЙСТВИИ

Кравченко М.Н., Диева Н.Н., Фатыхов Г.А.

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва

e-mail: Kravchenko.m@gubkin.ru

Оценивая опыт применения термогазохимического воздействия (ТГХВ) на различных месторождениях России, авторами был установлен эффект генерации дополнительных углеводородов (УВ) из неподвижной матрицы коллектора. Использование в качестве рабочего агента бинарной смеси на основе нитрата аммония [1] приводит к изменению свойств пластового флюида и трансформации пористой матрицы. После проведения ТГХВ наблюдается снижение вязкости, увеличение подвижности флюида, а также приведение в подвижное состояние ранее неподвижной битуминозной части запасов коллектора за счет раскапсулирования части ранее неподвижных флюидов. Также авторами выдвигалась гипотеза о дополнительной генерации подвижных углеводородов из органического вещества (ОВ) матрицы [2]. Именно за счет этих трех факторов стало возможным обосновать успешность применения метода на месторождениях, где зафиксировано увеличение прироста добычи в 3-7 раз даже для пластов на поздней стадии разработки. Так, для скважины Куакбашской площади Ромашкинского месторождения организованный процесс ТГХВ привел к выводу скважины из фонда бездействующих на период устойчивой добычи на период около двух лет, что превышает сроки интенсификации притока при использовании на этом месторождении ГРП или других методов повышения нефтеоттдачи (МУН). Кроме того, гипотеза о генерации объясняет эффект «спонтанного» роста дебитов скважин вне зоны применения МУН.

Создание авторами комплексной гидроперколяционной модели [3] позволяет обоснованно оценивать степень образования подвижных углеводородов при моделировании лабораторных исследований на реальных кернах. Так в экспериментах по гидротермальному воздействию [4] на образцах кернов Ромашкинском месторождении было уставлено, что при температурах около 360°С происходит выход тяжелых высоковязких фракций, а при температурах около 600°С вес минеральной матрицы заметно изменяется, что можно объяснить как раз генерацией из керогена, присутствие которого на данном месторождении зафиксировано и методом Rock Eval.

Авторами данной работы построена математическая модель, которая в соответствии с экспериментами [4] дает возможность учесть факторы раскапсулирования тяжелых фракций УВ и генерации подвижных УВ при повышении температуры пласта в призабойной зоне скважины при разложении нитрата аммония в период после закачки бинарной смеси.

На Рис.1а приведены эпюры температуры в призабойной зоне на скважине Куакбашской площади Ромашкинского месторождения, где выделен коридор температур, зафиксированных в экспериментах [4] на кернах этого месторождения.

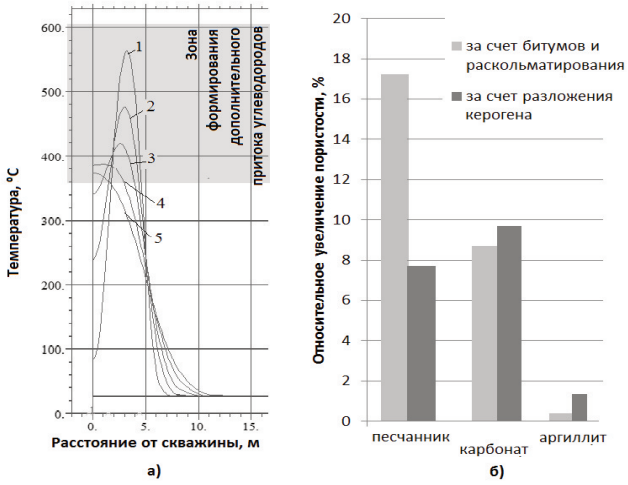


Рис.1. Результаты моделирования.

На Рис.1б также приведены данные по генерации УВ по другим площадям [5], которые показывают, что существенным фактором является структура матрицы и ее минеральный состав.

Анализ физического эксперимента по гидротермальному воздействию на реальных образцах, дал возможность адаптировать математической модели описывающую процесс ТГХВ к условиям реальных промысловых экспериментах, в том числе на коллекторах с высоким уровнем ОВ, что дает возможность увеличить степень извлекаемости УВ за счет термогенерации.

Список литературы

4. Dieva N. N., Kravchenko M. N., Muradov A. V., Lishchuk A. N., Evtyukhin A. V. Hydrodynamic analysis of the efficiency of thermochemical methods at deposits with complicated development conditions // J. Phys.: Conf. Ser. 2019.V. 1359. P. 012027.
5. Кравченко М.Н., Диева Н.Н., Мурадов А.В. Моделирование термохимического воздействия на керогеносодержащие пласты с учетом изменения фильтрационно-емкостных свойств. XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Уфа: РИЦ БашГУ. 2019. С. 374–376.
6. Кравченко М.Н., Кадет В.В., Ярыш В.В., Диева Н.Н., Лищук А.Н. Лищук. Перколяционный подход к гидродинамическому моделированию заводнения с использованием активных агентов. SOCAR Proceedings. 2020. No. 1. P. 029–035.
7. Каюкова Г.П. Изменения нефтегенерационного потенциала доманиковых пород в условиях гидротермальных и пиролитических воздействий. [Электронный ресурс] / Г.П. Каюкова, Н.М. Хасанова, Д.Т. Габдрахманов, А.Н. Михайлова, Н.А. Назимов, О.С. Сотников, А.М. Евдокимов. // Актуальные проблемы нефти и газа. 2017. № 4(19). С. 1–17.
8. Каюкова Г.П., Киямова А.М., Нигмедзянова Л.З., Рахманкулов Ш.М., Шарипова Н.С., Смелков В.М. Превращения остаточной нефти продуктивных пластов Ромашкинского месторождения при гидротермальном воздействии // Нефтехимия. 2007. Т. 47. № 5. С. 349–361.

Работа поддержана РФФИ (грант № №19-07-00433 А)

УДК 621.039.5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА МОДЕЛЯХ ТВС-КВАДРАТ ДЛЯ РЕАКТОРОВ PWR

Куприянов А.В.[1], Молодцов А.А.[1], Осин А.Б.[1], Сорокин В.Д.[1], Шипов Д.Л.[1], Морозкин О.Н.[2]

[1] Акционерное Общество «Опытное Конструкторское Бюро Машиностроения им. И.И. Африкантова», Нижний Новгород
[2] Акционерное Общество «ТВЭЛ»

e-mail: Physnet@okbm.nnov.ru

ТВС-КВАДРАТ (ТВС-К) – проект тепловыделяющей сборки для активных зон реакторов типа PWR, принадлежащий топливной компании «ТВЭЛ» и предназначенный для расширения экспансии отечественных технологий на западном рынке ядерного топлива. В создании и обосновании ТВС-К приняли участие целый ряд российских организаций. Главным конструктором топлива является АО «ОКБМ Африкантов».

Конструкция ТВС-К состоит из головки, тепловыделяющих элементов (твэл) с коридорным шагом расположения, направляющих каналов и хвостовика. Для обеспечения проектных показателей мощности реактора и эффективного отвода тепла с поверхности твэлов в конструкции кассеты применены интенсификаторы теплообмена (ИТ) [1]. ИТ представляют собой дефлекторы потока, которые устанавливаются на верхних кромках пластинчатых дистанционирующих решеток (ПДР) и локально позиционируюмых по высоте сборки перемешивающих решетках (ПР), используемых дополнительно для получения более высоких запасов до кризиса теплоотдачи [2, 3, 4].

В докладе представлены результаты исследования влияния пластинчатых решеток на критические тепловые потоки в активной зоне реактора PWR и включают в себя:
– результаты исследований критических мощностей моделей ТВС-К с шестью ПДР и дополнительно установленными по высоте тремя ПР;
– сравнительный анализ результатов испытаний, выполненный путем сопоставления значений критических мощностей испытуемых сборок, в том числе и с моделью, оснащенной шестью ПДР без ИТ.

Экспериментальные исследования теплотехнических характеристик ТВС-К проводились на теплофизическом стенде АО «ОКБМ Африкантов», который включает в себя основной контур с принудительной циркуляцией теплоносителя, рассчитанный на рабочее давление до 18,0 МПа и вспомогательный контур для снятия тепла с основного контура.

Испытываемые модели представляли собой 16-ти стержневые пучки, заключенные в прочный корпус электронагревательной колонки. В моделях был реализован неравномерный радиальный профиль энерговыделения (K_r) с максимальными значениями на четырех центральных стержнях. Значения K_r варьировались в диапазоне от 1,17 до 1,19. Аксиальный профиль энерговыделения (K_z) был равен 1 [5]. Общая длина зоны электрического обогрева моделей составляла 3 метра. Конструктивные и геометрические характеристики элементов моделей соответствовали характеристикам элементов штатных кассет.

Для обоснования теплотехнической надежности активной зоны реактора PWR с ТВС-К исследования проведены в широком диапазоне режимных параметров, которые перекрывают режимы нормальной эксплуатации и нарушения нормальной эксплуатации. Диапазон режимных параметров был выбран следующий:
– давление 13,2 – 16,7 МПа;
– температура 270 – 310°С;
– расход 1,8 – 5,7 кг/с.

Момент наступления кризиса теплоотдачи при выполнении режимов фиксировался по скачкообразному изменению температуры во внутренней полости имитаторов твэлов. Значение мощности экспериментальной сборки на ступени мощности, на которой произошел первый непропорциональный рост температуры во внутренней полости одного из центральных имитаторов твэлов, считалась критической.

Измерение температуры во внутренней полости имитаторов твэлов осуществлялось с помощью термозондов, состоящих из нескольких термопреобразователей (термопар), установленных внутри имитаторов на определенных высотных участках от верха зоны тепловыделения.

В результате экспериментов получено, что применение на ПДР интенсификаторов теплообмена улучшает условия теплообмена в ТВС-К и обеспечивает увеличение критической мощности моделей в среднем на ~15% по сравнению с ПДР без ИТ, а дополнительная установка ПР дает прирост мощности в ~11% по сравнению с моделями с ПДР, оснащенными дефлекторами потока.

Список литературы

1. Самойлов О.Б., Носков А.С., Шипов Д.Л. и др. Гидродинамические особенности течения теплоносителя за перемешивающей дистанционирующей решеткой ТВС-КВАДРАТ реактора PWR. Теплоэнергетика. 2019. Т. 6. № 4. С. 32–38.
2. Самойлов О.Б., Шипов Д.Л., Куприянов А.В. и др. Исследование эффективности пластинчатых решеток-интенсификаторов теплообмена в сборках типа ТВСА-Т. Атомная энергия. 2020. Т. 128. № 1. С. 18–23.
3. Перепелица Н.И. Дистанционирующие решетки со смесительными элементами для ТВС PWR. Часть 1. Атомная техника за рубежом. 2018. № 3 С. 10–15.
4. Лощинин В.М., Пометько Р.С., Селиванов Ю.Ф. и др. Теплогидравлические исследования в обоснование проекта ВВЭР-1200. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2016. № 5. С. 59–71.
5. Кириллов П.Л., Жуков А.В., Логинов Н.И. и др. Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике. Т. 2. Ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы. Под ред. Кириллова П.Л. М.: ИздАт. 2013. 688 с.

УДК 536.24, 532.546

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ ПОРИСТОГО СЛОЯ НА ПРОЦЕССЫ В ТЕПЛОВОЙ ТРУБЕ

Литвинцева А.А., Чеверда В.В.

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

e-mail: nastja_@mail.ru

Тепловая трубка представляет собой пассивный теплообменник без движущихся частей, работающий в широком диапазоне температур и тепловых потоков. Использование тепловых труб является перспективным направлением в различных сферах: от охлаждения микроэлектроники до космических применений, благодаря высокой теплопередачи и высокой эффективности без дополнительного потребления электроэнергии, а также своим конструкционным преимуществам (гибкости, компактности) [1].

На данный момент проведены испытания и исследования, и построены теоретические модели, описывающие работу тепловых труб. Эффективность тепловой трубы была исследована в зависимости от используемых материалов стенок и фитиля, а также от рабочей жидкости. Проведен анализ совместимости материалов и рабочих жидкостей, улучшен дизайн. Были подобраны оптимальные параметры и разработаны подходящие/соответствующие материалы для конкретных температурных диапазонов и длительного срока службы [2].

В работе приводятся результаты экспериментального исследования влияния толщины пористого слоя на теплообмен в цилиндрической тепловой трубе. Исследовались медные тепловые трубки со стенкой Ø 6 х 0,5 мм, длиной 100 мм с различной толщиной пористого слоя. Для получения пористого слоя использовался медный мелкодисперсный порошок ПМС-1. Толщина пористого слоя варьировалась от 0,5 мм до 2 мм. В качестве рабочей жидкости использовалась вода. Тепловые трубки изготавливались запеканием в вакуумной печи.

На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки. Нагреватель намотан на испаритель и подключен к источнику питания TTi QPX 1200L. Конденсатор охлаждается жидкостным теплообменником, в который поступает вода из термостата LOIP FT-211-25. Экспериментальный стенд оснащен системой измерения температуры: ИК-камерой и термопарами [3].

В работе исследовалась теплопередающая способность тепловой трубки в зависимости от толщины пористого слоя и перепада температур между испарителем и конденсатором. Распределение температуры вдоль тепловой трубки регистрировалось с помощью ИК-камеры Titanium HD 570M (рис. 2). Температура измерялась термопарами К типа в зоне испарителя, конденсатора и адиабатной части тепловой трубы. Результаты измерений температур сопоставлялись. Экспериментально установлена зависимость теплового потока от перепада температур между испарителем и конденсатором и толщины пористого слоя.

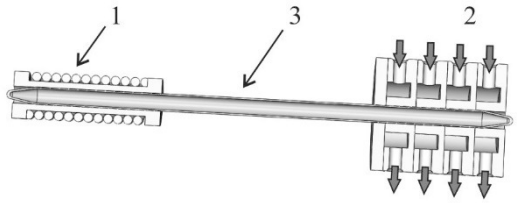


Рис. 1. Схема экспериментального стенда. 1 – испаритель, 2 – конденсатор, 3 – тепловая трубка.

В работе исследовалась теплопередающая способность тепловой трубки в зависимости от толщины пористого слоя и перепада температур между испарителем и конденсатором. Распределение температуры вдоль тепловой трубки регистрировалось с помощью ИК-камеры Titanium HD 570M (рис. 2). Температура измерялась термопарами К типа в зоне испарителя, конденсатора и адиабатной части тепловой трубы. Результаты измерений температур сопоставлялись. Экспериментально установлена зависимость теплового потока от перепада температур между испарителем и конденсатором и толщины пористого слоя.

Проведено сравнение экспериментальных результатов с имеющейся теоретической моделью и показано удовлетворительное соответствие.

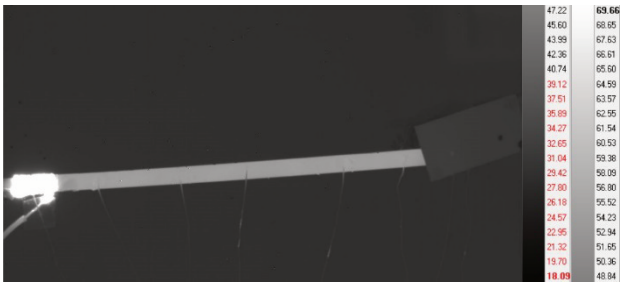


Рис. 2. ИК изображение работающей тепловой трубы для теплового потока 40 Вт.

Список литературы

1. C.W. Chan et al., Heat utilisation technologies: Acritical review of heat pipes, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. V. 50. P. 615–627.
2. Lips S., Sartre V., Lefevre F., Khandekar S., Bonjour J. Interfacial Phenomena and Heat Transfer. 2016. V. 4(1). P. 33.
3. Cheverda V, Ronshin F, Experimental study of heat transfer in a heat pipe // Journal of Physics: Conference Series. 2019. P. 1369.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН (АААА-А19-119083090009-6)

УДК 532.5; 532.6

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ВДОЛЬ УЛЬТРАГИДРОФОБНОЙ ТЕКСТУРИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Лобасов А.С.[1,2], Минаков А.В.[1,2]

[1]Сибирский федеральный университет, Красноярск
[2]Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

e-mail: perpetuityrs@mail.ru

В настоящее время большое внимание уделяется вопросам энергоэффективности и энергосбережения. В различных областях науки и техники, например, в аэрокосмической индустрии, транспорте и энергетике активно продвигается миниатюризация устройств и технологических процессов. В связи с этим, равно как и с бурным развитием электроники и медицины, наблюдается существенный рост интереса к капиллярной гидродинамике в микросистемах. Однако в микроканалах, где поперечные размеры очень малы, то есть стенки расположены очень близко друг к другу, при выполнении условия прилипания скорость движения жидкости также очень мала. Увеличение скорости требует серьёзных затрат энергии, приложения значительных давлений, что может привести к разрушению канала. Кроме того, параболический профиль скорости ведет к значительному градиенту скорости вдоль продольной оси канала, что является причиной высоких значений гидравлических сопротивлений. Так, например, скорость течения воды в микроканале со средним гидравлическим диаметром 100 мкм при числе Рейнольдса, равном единице будет равно 10 м/с, а перепад давлений в канале такого поперечного размера и длиной 10 см составит около 6,32 атм. Соответственно, при увеличении числа Рейнольдса будут ещё более существенно возрастать скорости течения и перепады давлений в таком канале. Одним из возможных решений данной проблемы является использование явления скольжения на стенке, которое заключается в том, что в силу определенных поверхностных свойств скорость жидкости у стенок становится отличной от нуля. Такими поверхностными свойствами могут быть гидрофобность поверхности, наличие газа в полостях ультрагирофобных текстур поверхности, поверхностный заряд, комбинация этих эффектов и пр. Ультрагидрофобные поверхности имеют довольно сложный, отличный от плоскости, рельеф, и могут стабилизировать пузырьки газовой фазы внутри полостей этого рельефа. При использовании таких поверхностей жидкость фактически большую часть своего пути движется не по твердой поверхности, а по газовой фазе. На межфазной границе жидкость-газ трение очень мало, что приводит к существенному снижению гидравлического сопротивления такого канала. Обычно ультрагидрофобные поверхности создаются с использованием специальных методов текстурирования.

Безусловно, постоянно растущая потребность в подобных материалах и устройствах на основе таких материалов породила всё возрастающий интерес в научном сообществе к данной тематике. Это становится очевидным при анализе количества публикаций в реестре scopus.com, содержащих в ключевых словах слово “superhydrophobic” с 2010 по 2019 год (рис. 1). Наблюдается устойчивый линейный рост количества публикаций во времени. В последующие несколько лет ожидается более значительное увеличение интереса к данной тематике, которая, таким образом, является чрезвычайно актуальной.

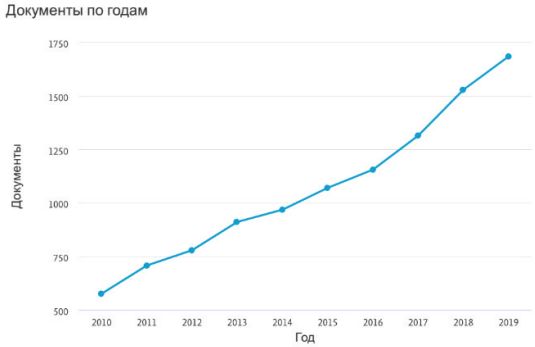


Рис. 1. Количество публикаций с 2010 по 2019 год, содержащих в ключевых словах слово «superhydrophobic»

В работе проведено численное моделирование течения жидкости в микроканале со структурированными шероховатостями на стенке, причём как в двумерной, так и в трёхмерной постановке с учётом наличия двухфазной области, когда изначально микрообъект пустой (заполнен воздухом), а потом заполняется жидкостью. В этом случае возможно удержание пузырьков воздуха между коническими шероховатостями за счёт капиллярных эффектов. Исследование проводилось с применением метода жидкости в ячейках (Volume Of Fluid). Вследствие применения этой методики расчёт проводился в нестационарной постановке, с использованием варьируемого временного шага, причём необходимым условием для него было неравенство $C < 0{,}5$ (число Куранта). Коэффициент поверхностного натяжения между жидкостью и воздухом задавался постоянным. В исследовании рассматривалось влияние относительного размера шероховатости, причём абсолютный размер шероховатости оставался постоянным, равным 100 нм, а высота микроканала варьировалась в пределах относительной шероховатости от 10% до 0,625%. Кроме этого, исследовалась зависимость о числа Рейнольдса, который изменялся в пределах от 1 до 1000. Была показана зависимость перепада давлений в канале и длины скольжения от этих параметров.

Исследование влияния относительного размера текстурированной поверхности выполнено при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 19-79-10217, исследование течения жидкости в микроканале выполнено при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 19-48-240015.

УДК 536.24

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ НА РАБОЧЕМ УЧАСТКЕ НА СИНТЕЗ ГАЗОВОГО ГИДРАТА МЕТОДОМ КИПЕНИЯ-КОНДЕНСАЦИИ ГИДРАТООБРАЗУЮЩЕГО ГАЗА В ОБЪЕМЕ ВОДЫ

Мелешкин А.В., Глезер В.В., Марасанов Н.В., Миронова Н.Н., Мариковская С.М.

Новосибирский государственный университет

e-mail: mav@itp.nsc.ru

В данной работе представлено экспериментальное исследование влияния температуры воды на процесс гидратообразования метом кипения-конденсации сжиженного гидратообразующего газа в объеме воды. В качестве гидратообразующего газа был использован фреон 134a. В работе [1] были представлены режимные параметры влияющие на процесс гидратообразования, такие как уровень воды на рабочем участке и интенсивность нагрева дна рабочего участка. Также был описан процесс синтеза газового гидрата, где рабочий участок был разделен на три зоны по его высоте. Первая зона (выше уровня воды) – зона конденсации находится в газовой фазе, выше линии насыщения фреона 134a, в ней происходит конденсация газа на стенках с дальнейшим стеканием вниз. Третья зона (возле дна) – зона кипения, среда находится в области ниже линии насыщения фреона 134a, а также ниже области равновесия газового гидрата исследуемого газа, что может говорить о кипении сжиженного газа на дне установки, при этом процесс гидратообразования отсутствует. Вторая зона – зона гидратообразования, в данной области соблюдены термобарические условия при которых происходит процесс гидратообразования, а фреон 134a находится выше температуры насыщения при текущем давлении, где он может находится только в газообразном состоянии. В этой зоне гидрат образуется на поверхности пузырьков, высвобожденных в результате кипения сжиженного фреона 134a. Влияние температуры воды в этой области ранее не рассматривалось, поэтому в работе представлены полученные экспериментальные результаты данного исследования.

Методика проведения эксперимента заключается в следующем. Камера рабочего участка габаритными размерами 150x150x740 заполняется водой объемом 4 л. Это соответствует уровню воды 180 мм. Далее через боковые стенки начинается охлаждение рабочего участка с постоянной температурой – 2°C. В результате чего происходит охлаждение воды до температуры 2–5°C. Давление соответствует значению на линии насыщения, относительно температуры зоны конденсации. Затем производится подача газообразного гидратообразующего газа на рабочий участок массой 250 г. Поступающий газ начинает конденсироваться на охлаждаемых стенках и далее, в виде капель, падает вниз, формируя слой сжиженного газа на дне рабочего участка. На этом этапе начинается подвод тепла ко дну рабочего участка с помощью нагревательного элемента (600 Вт/м^2). Вследствие нагрева слой сжиженного газа начинает кипеть, образующиеся при этом пузырьки поднимаются по охлажденному объему воды, попадая в зону гидратообразования, в результате чего на их поверхности начинает нарастать корочка газового гидрата. Поднимаясь до поверхности воды, корочка лопается и из неё высвобождается газ, который создает в системе избыточное давление. После подъема определенного количества пузырьков, в газовом объеме создается достаточное условие для конденсации газа, который падает на дно рабочего участка в виде капель и включается в процесс кипения.

В ходе экспериментальных исследований было показано, что температура воды играет важную роль на выход гидратной массы (рис. 1). Так, было показано что температура воды влияет на высоту слоя в области в которой происходит процесс гидратообразования, в результате чего всплывающий пузырёк проделывает более длинный путь по этой области в которой на его поверхности происходит процесс гидратообразования. Максимальный выход гидратной массы был получен при температуре воды равной 3 °C. При более низких температурах газ в пузырьке конденсируется, в результате чего образовавшаяся капля падает вниз. И опускаясь на дно рабочего участка, сливается со слоем сжиженного газа, возвращаясь в процесс кипения. При этом процесс гидратообразования практически останавливается.

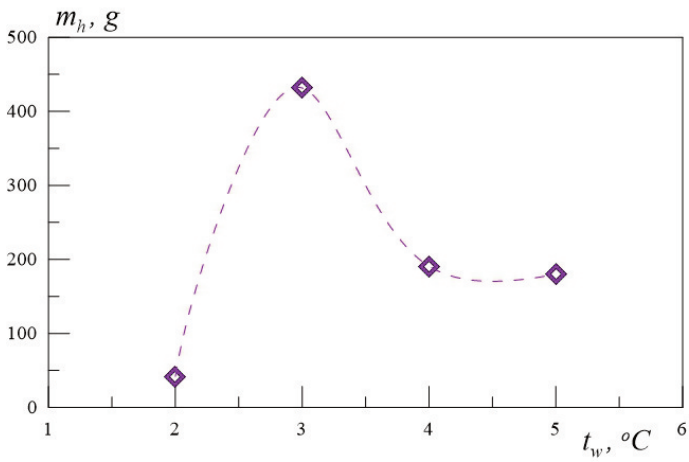


Рис. 1. Влияние температуры воды на выход гидратной массы.

Список литературы

1. Meleshkin A.V., Bartashevich M.V., Glezer V.V. Investigation of the effect of operating parameters on the synthesis of gas hydrate by the method based on self-organizing process of boiling-condensation of a hydrate-forming gas in the volume of water. Applied Surface Science V. 493. P. 847–851.

Исследование выполнено за счет гранта РНФ (проект № 18-19-00124)

УДК 532.517

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИСПАРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С ПЛЕНОЧНЫМИ ПОТОКАМИ

Минаков А.В.[1,2], Лобасов А.С[1,2], Зайцев Д.В.[2,3], Кабов О.А.[2,3]

[1] Сибирский федеральный университет, Красноярск
[2] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
[3] Новосибирский государственный университет

e-mail: AMinakov@sfu-kras.ru

Одной из важнейших проблем теплофизики сегодня является охлаждение микроэлектронного оборудования. Существующие электронные микрочипы выделяют тепловые потоки на уровне 100 Вт/см^2. С развитием микропроцессорной техники тепловые потоки в горячих точках оборудования будут приближаться к 1000 Вт/см^2. Поэтому проблема теплоотвода является одной из ключевых в современной электронике и от ее решения во многом зависит дальнейший рост производительности микропроцессоров. Это требует разработки охлаждающих устройств нового поколения. Примером такого устройства может служить новая система эффективного охлаждения, в которой отвод тепла происходит за счет интенсивного испарения тонкой пленки жид-кости, движущейся в плоском микроканале под действием потока газа или пара [1-3].

В данной работе разработана пространственная математическая модель этой испарительной системы. Модель полностью воспроизводит реальную пространственную геометрию испарительной системы и легко адаптируется к параметрам экспериментальной установки. Модель построена на базе метода жидкости в ячейках и учитывает термокапиллярные эффекты и процесс испарения пленки с учетом динамического угла смачивания. Для описания теплообмена при пленочном режиме течения в испарительной ячейке использована численная методика, основанная на методе жидкости в ячейках (VOF) [4]. Для моделирования поверхностного натяжения в рамках VOF метода использовался CSF алгоритм [5]. Для определения динамического контактного угла была выбрана модель, предложенная Кистлером [6] и основанная на использовании равновесного значения контактного угла и капиллярного числа. Для разрешения границы раздела фаз при движении пленки использовалась технология градиентной адаптации расчетной сетки. С помощью данной технологии расчетная сетка в процессе расчета автоматически сгущается в области больших градиентов решения. В качестве управляющего параметра в данном случае используется градиент объемной доли жидкости. Ячейки сетки в области границы раздела могут быть в четыре-шестнадцать раз меньше, чем в исходной сетке. За счет этой технологии удалось получить приемлемое по точности решение на доступных по детализации расчетных сетках.

Проведена серия методических расчетов с целью определения влияния детализации расчетных сеток и других численных параметров на результаты численного моделирования. В итоге общее количество ячеек расчетной сетки для полной модели испарительной ячейки в процессе динамической адаптации составило около 28млн.

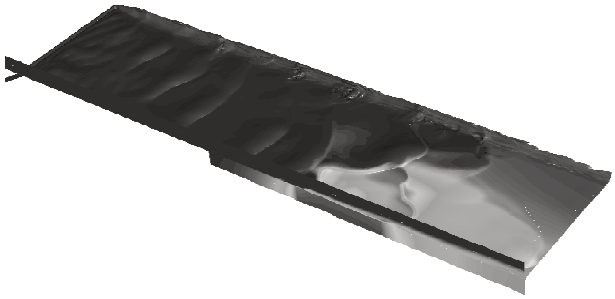


Рис.1. Распределение температуры на поверхности пленки и в центральном продольном разрезе испарительного устройства.

Проведено численное моделирование нескольких режимов течения пленки в испарительной ячейке при температуре нагревателя ниже начала кипения (см. рис. 1). В результате численного моделирования полностью подтверждены ранее обнаруженные в эксперименте режимы течения. Было показано, что модель хорошо воспроизводит все особенности поведения пленки в этих режимах. Получено хорошее согласие расчета и эксперимента по форме поверхности и толщине пленки, по длинам волн и частотам прохождения гребней, а также уровню тепловых потоков.

Список литературы

1. Zaitsev D.V., Kabov O.A. Microgap cooling technique based on evaporation of thin liquid films. Proceedings of the ASME InterPACK. 2009.
2. Kabov O.A., Zaitsev D.V., Cheverda V.V., Bar-Cohen A. Evaporation and flow dynamics of thin, shear-driven liquid films in microgap channels. Experimental Thermal and Fluid Science. 2011. V. 35. P. 825.
3. O. Kabov, D. Zaitsev, E. Tkachenko. Interfacial thermal fluid phenomena in shear – driven thin liquid films. Proceedings of the 16th International Heat Transfer Conference, IHTC-16 August 10–15, 2018. Beijing. China.
4. Hirt C.W., N. B. D. Volume of fluid (VOF) methods for the dynamic of free boundaries. J. Comput. Phys. 1981. V. 39. P. 201–226.
5. Brackbill, J. U., Kothe, D. B., & Zemach, C.A continuum method for modeling surface tension. J. Comput. Phys. 1992. V. 100. P. 335–354.
6. Kistler, S.F. Hydrodynamics of wetting, in: J.C. Berg (Ed.). Wettability. Marcel Dekker Inc. New York. 1993.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 19-19-00695)

УДК 532.6

АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ПРОЦЕССОВ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ КОРРОЗИЕЙ ЁМКОСТЕЙ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ И ТРАНСПОРТИРОВКИ ГЕЛЕОБРАЗНЫХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ МАСЛОНАПОЛНЕННЫХ КРИОГЕЛЕЙ

Орлова Е.Г., Феоктистов Д.В.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск

e-mail: lafleur@tpu.ru

Загрязнение окружающей среды отработанными смазочными маслами, нефтяными отходами является глобальной проблемой негативного воздействия на окружающую среду, особенно сильно выраженной на территориях Крайнего Севера, Арктики и Антарктики. Перспективное решение этой проблемы состоит в загущении (переводе в гелеобразное состояние) отработанных масел, нефтяных отходов с возможностью последующей их утилизации путем сжигания с выработкой энергии, в том числе на локальных объектах малой энергетики. В рамках данной работы выполнен анализ потенциально опасных процессов, обусловленных коррозией ёмкостей, предназначенных для хранения и транспортировки гелеобразных топлив на основе маслонаполненных криогелей.

Целью работы является исследование возможности управления смачиванием и стойкостью к коррозии фрагмента емкости, изготовленной из алюминиевого сплава, за счет обработки лазерным излучением.

Исследуемые образцы, изготовленные из алюминиевого сплава (Al 91.2, Mg 6.8, Mn 0.8, Fe 0.4, Si 0.4, Zn 0.2, Ti 0.1, Cu 0.1 в масс. %), выполнены в Т-образной форме (Д×Ш×Т в табл. 1). Их обработка выполнена наносекундным иттербиевым импульсным лазером (IPG-Photonics) с длинной волны 1064 нм. Диаметр пятна – 60 мкм ($1/e^2$), энергия в импульсе – 1 мДж в моде TEM_{00}, частота – 20 кГц, время воздействия – 200 нс. Сформировано два вида текстур согласно ранее выделенным группам [1]: упорядоченная (совокупность кратеров) и анизотропная (совокупность струек и капель металла). Образец № 1 оставался полированным.

Таблица 1. Свойства образцов.

Образец	Размеры, мм	Текстура	СКУ,°
№1	11,0×10,0×2,8	-	88,1
№2	10,0×10,0×2,6	анизо-	3
№3	10,4×10,5×2,5	тропная	122,3
№4	10,0×10,0×2,6	упорядо-	34
№5	10,2×10,4×2,8	ченная	117,4

Свойства смачивания исследованы теневым методом [1] при помещении капли воды объемом 5 мкл на поверхность. Образец №2 сразу после обработки проявлял супергидрофильные свойства, №4 – гидрофильные. С целью ускорения инверсии смачивания сплава после обработки лазером, по одному образцу из каждой группы (№3, №5) подвергались низкотемпературному отжигу при температуре в муфельной печи 100°C в течение 5 часов. После чего, эти образцы стали гидрофобными (табл. 1).

Электрохимическая коррозия поверхностей исследовалась на потенциостате/гальваностате Autolab PGSTAT 30 в термостатируемой трехэлектродной ячейке в насыщенном Ar электролите 0.5 M NaCl при температуре 25°C. В качестве рабочего электрода использовались исследуемые образцы, вспомогательного – Pt пластина, электрода сравнения – хлорсеребряный электрод, заполненный насыщенным раствором KCl. Увеличение тока коррозии (рис. 1) в области более высоких значений потенциалов связано с наличием необработанных участков на образцах с упорядоченной текстурой, для которых характерна более интенсивная точечная коррозия.

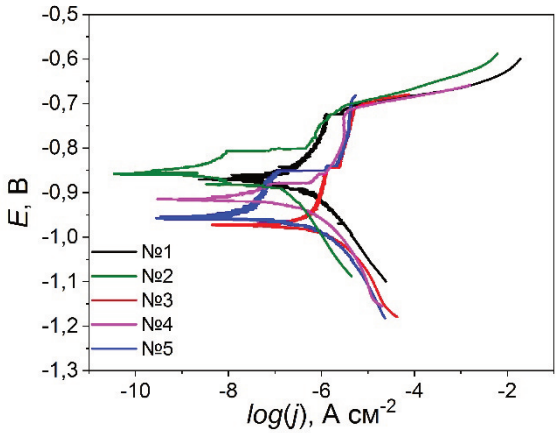


Рис. 1. Поляризационные кривые образцов, зарегистрированные при скорости развертки 1 мВ/с.

Сравнение токов коррозии (рис. 1) позволяет сделать вывод, что изменение свойств смачивания после лазерной обработки приводит к улучшению антикоррозионных свойств сплава. Особенно это выражено на образце №2. Последнее связано с реализацией на нем гомогенного смачивания, на образце №3 – гетерогенного (воздух в неровностях при контакте с жидкостью). В случае образца №2, помимо образования барьерного слоя происходит значительное увеличение площади контакта образец / раствор. Это и определяет рост тока коррозии на образце №2. Следовательно, поверхность сплава с анизотропной текстурой и гидрофобными свойствами характеризуется более высокой устойчивостью к коррозии.

Сделан вывод о том, что лазерная обработка поверхностей ёмкостей из алюминиевого сплава является перспективным способом снижения опасности кородирования сплава по электрохимическому механизму. Установлено, что исследованные образцы с разной текстурой поверхности по устойчивости алюминиевого сплава к коррозии располагаются в возрастающей последовательности №1–№4–№5–№2–№3.

Список литературы

1. Kuznetsov G.V., Feoktistov D.V., Orlova E.G., Batishcheva K., Ilenok S.S., Unification of the textures formed on aluminum after laser treatment. Appl. Surf. Sci. 2019. V. 469. P. 974–982.

УДК 536.24

СВЕРХКРИТИЧЕСКИЙ ТЕПЛОПЕРЕНОС В РАСТВОРАХ С НИЖНЕЙ КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ РАСТВОРЕНИЯ

Рютин С.Б., Скрипов П.В.

Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург

e-mail: ryutin.sergey@gmail.com

Спинодальный распад бинарных растворов привлекает внимание исследователей как фундаментальная проблема, так и как возможность решения прикладных задач интенсификации теплообмена. В данной работе представлены результаты нестационарного теплообмена бинарного раствора полипропиленгликоль (ППГ-425)/вода, являющегося раствором с нижней критической температурой растворения (НКТР).

Известные экспериментальные работы посвящены исследованию интенсификации теплообмена в растворах с верхней критической точкой растворения (ВКТР), см., например [1,2]. В них предположено, что спинодальный распад вызывается как диффузией, так и самоиндуцированной конвекцией, и их соотношение определяется вязкостью жидкости. Для жидкостей с малой вязкостью доминирующим процессом является конвекция. Обсуждая итоги, авторы [1,2] делают два основных вывода. Первое, обнаружен кратный прирост теплоотдачи при спинодальном распаде раствора в сравнении со случаем однородного раствора. Второе, интенсификация теплообмена слабо зависит от глубины захода в область неустойчивых состояний раствора.

Отметим, что в этих работах заход в область неустойчивых состояний производился охлаждением одной из стенок ячейки, глубина захода по температуре была небольшой. В этой связи, второй из упомянутых выводов остается дискуссионным.

В случае раствора с НКТР заход в область неустойчивых состояний можно осуществить нагревом, начиная с температуры, при которой раствор остается гомогенным. Была применена импульсная методика постоянной мощности нагрева тонкого проволочного зонда, являющегося одновременно нагревателем и термометром сопротивления. Время нагрева варьировалось от единиц до сотен миллисекунд. В качестве зонда использовалась платиновая проволока диаметром 20 μм и рабочей длиной порядка 1 см. Малый диаметр зонда обеспечивает собственное время тепловой релаксации такого зонда ~ 1 μс, а малая площадь при длине 1 см позволяет легко получать большие плотности теплового потока через его поверхность (единицы-десятки МВт/м^2) при небольшой электрической мощности, рассеиваемой на зонде. Установленное значение мощности (с возможностью ступенчатого изменения ее величины непосредственно в ходе импульса) поддерживается быстродействующим электронным регулятором.

Наиболее интересным с точки зрения интенсификации теплообмена оказалось значение концентрации 30% ППГ-425 в воде. Экспериментально был установлен диапазон плотностей теплового потока, при котором интенсификация теплообмена выражена наиболее отчетливо. Таковым является значение плотности теплового потока порядка 10 МВт/м^2 при временах нагрева порядка 10 мс и более (см. рис. 1).

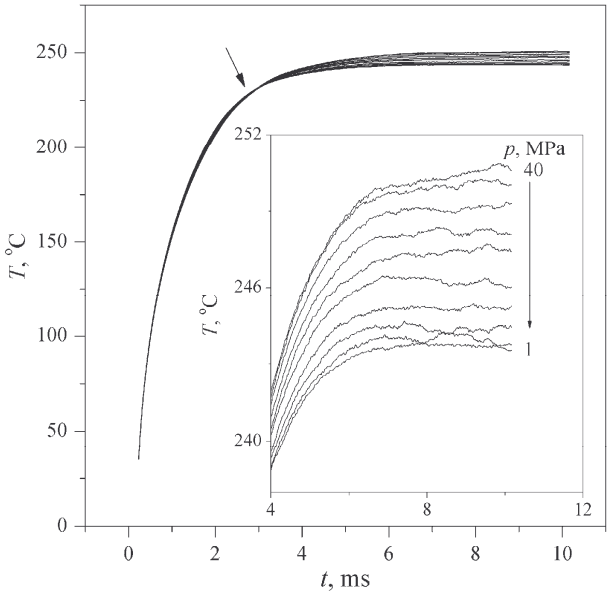


Рис. 1. Термограммы для раствора 30% ППГ425-вода. Плотность теплового потока ≈ 9,2 МВт/м^2, параметром служит давление.

Стрелкой на основном рисунке отмечен момент инверсии хода термограмм, нехарактерной для полностью совместимых растворов и их чистых компонентов [3]. Момент инверсии достаточно точно указывает температуру начала спинодального распада: ее значение составляет приблизительно 230^{o}C, глубина захода в область неустойчивых состояний – 180^{o}C. То, что термограммы принимают практически горизонтальный вид, однозначно свидетельствует о существенной интенсификации теплообмена.

Используя возможность ступенчатого повышения мощности, удалось еще увеличить глубину захода. Наблюдаемые при этом термограммы также принимают горизонтальный вид, причем относительно небольшому приросту температуры соответствует существенный рост плотности теплового потока.

Список литературы

1. Stefano Farise, Andrea Franzoni, Pietro Poesio, Gian Paolo Beretta. Heat transfer enhancement by spinodal decomposition in micro heat exchangers. Experimental Thermal and Fluid Science. 2012. V. 42 P. 38–45.
2. P. Poesio, A. M. Lezzi, and G. P. Beretta. Evidence of convective heat transfer enhancement induced by spinodal decomposition // PHYSICAL REVIEW E. 2007. V. 75. P. 066306.
3. Skripov P.V. and Rutin S.B. Heat transfer in supercritical fluids: the case of high-power heat release. Interf. Phenom. Heat Transf. 2017. V. 5. No. 3. P. 187–200.

Работа поддержана РНФ (грант № 19-19-00115)

УДК 621.9

УВЕЛИЧЕНИЕ ТЕПЛООТДАЧИ ИСПАРИТЕЛЯ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Сажин И.А.

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск

e-mail: sajinia@ngs.ru

Теплоотдача испарителя холодильной установки происходит в условиях кипения потока хладагента. Изменение коэффициента теплоотдачи на участке дисперсно-кольцевого режима течения двухфазного потока хладагента рассмотрено в работах [1 – 4]. Карты режимов течения Кутателадзе-Сорокина и Бейкера достоверно диагностируют состояние двухфазного потока хладагента в трубе испарителя холодильной установки. Комплексы Бейкера (x , y) вычисляются следующим образом:

$$x = \psi\frac{1-\chi}{\chi},\ y = 3600\frac{G_\chi}{\lambda},$$

$$\lambda = \left(\frac{\rho_L}{1000}\frac{\rho_G}{1,2}\right)^{0,5},\ \psi = \left[\frac{\sigma_0}{\sigma_L}\frac{\mu_L}{\mu_0}\left(\frac{1000}{\rho_L}\right)^2\right]^{0,5},$$

где G – массовый расход хладагента; χ – газосодержание потока; ρ_L, ρ_G – плотности жидкой и газовой фаз; σ_0, σ_L – коэффициенты поверхностного натяжения; μ_0, μ_L – коэффициенты динамической вязкости воды и хладагента, соответственно. Комплексы Кутателадзе-Сорокина вычисляются следующим образом:

$$K = W_G\rho_G^{0,5}\left[g\sigma_L\left(\rho_L-\rho_G\right)\right]^{-0,25},$$

$$N = \mathrm{Fr}\cdot\mathrm{We}^{1,25}\left(1+31\mathrm{Ga}^{-0,55}\right),$$

где $\mathrm{Fr} = W_L d\dfrac{\left(\rho_L-\rho_G\right)^{0,75}}{4g^{0,5}\sigma_L^{0,75}}$; $\mathrm{We} = \dfrac{\sigma_L}{gd^2\left(\rho_L-\rho_G\right)}$;

$\mathrm{Ga} = gd^3\left(1-\rho_G/\rho_L\right)\left(\rho_L/\mu_L\right)^2$; W_G, W_L – приведенные скорости газовой и жидкой фаз, соответственно; g – ускорение свободного падения; d – внутренний диаметр трубы испарителя. Исходные данные и теплофизические свойства хладагентов приведены в работе [3]. Двухфазные потоки хладагентов R-22, R-134a являются кольцевыми, режим течения R-600a – дисперсный. Следуя методике Бегза и Брилла [5, 6] возможно определение следующих режимов течения: разделенного, переходного, прерывистого, распределенного. Комплексы Бегза и Брилла вычисляются следующим образом:

$$\lambda = \frac{\rho_L(1-\chi)}{\rho_L(1-\chi)+\chi\rho_G},\ L_1 = 316\lambda^{0,302},$$

$L_2 = 9,25\cdot10^{-4}\lambda^{-2,468}$, $L_3 = 0,10\lambda^{-1,452}$, $L_4 = 0,50\lambda^{-6,738}$,

число Фруда: $\mathrm{Fr} = \left(W_G+W_L\right)^2/gd$. Полученные данные показывают выполнение условий: $\lambda < 0,4$ и $L_1 < \mathrm{Fr}$ для рассмотренной группы хладагентов при изменении газосодержания от 0,70 до 0,95. Таким образом, анализ карт режимов течения Кутателадзе-Сорокина, Бейкера, методики Беггза и Брилла показывает реализацию дисперсно-кольцевого двухфазного потока хладагентов в выбранной области испарителя холодильной установки. В этом случае величина критерия Нуссельта вычисляется следующим образом [2]:

$$\mathrm{Nu} = 0,117\left(c_f\mathrm{Fr}\right)^{0,5}\mathrm{Re}^{-0,17},$$

где $\mathrm{Fr} = W_G{}^2/gL$, L –длина трубы испарителя, c_f – коэффициент трения.

Определены значения коэффициентов теплоотдачи и критерия Нуссельта. Рассмотрен вариант сепарирования жидкой пленки хладагента на участке изменения газосодержания от 0,7 до 0,95, что позволяет увеличить теплоотдачу трубы испарителя до 10 %.

Список литературы

1. Теплоотдача при кипении / Кутателадзе С.С. Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы. Москва. 1952. Ленинград: Наука. 231 с.
2. Гогонин И.И Исследование теплообмена при пленочной конденсации пара. Новосибирск.: изд-во СО РАН.2015.235с.
3. Сажин И.А. Реализация двухфазных течений хладагентов, увеличивающих теплоотдачу конденсатора холоди льной установки. // Тезисы докладов. III Всероссийская научная конференция с элементами школы молодых ученых «Теплофизика и физическая гидродинамика». Ялта, Республика Крым. 2018. 10-16 сентября. С.77.
4. Юсида Х., Ямагучи С. Теплообмен при двухфазном течении фреона 12 в горизонтальных трубах // Достижения в области теплообмена: сб.статей. М.: Мир. 1970. с. 352–372.
5. Усачев А.П., Рулев А.В. Определение границ режимов течения парожидкостной пропан-бутановой смеси в проточных трубных испарителях // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2012. № 4. с.428–435 (дата обращения 06.04.2020 http://www.ogbus.ru).
6. Борис А.А., Лягов А.В. Определение режима течения потока газожидкостной смеси в трубопроводах на установках путевого сброса воды Арланской группы месторождений ОАО «АНК «Башнефть». // Электронный научный журнал «Нефтяное дело». 2012. № 2. с. 66–88. (дата обращения 08.04.2020 http://www.ogbus.ru).

УДК 536.24

ИССЛЕДОВАНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДИСПЕРГИРОВАННЫМ ПОТОКОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Сморчкова Ю.В., Ильин В.В., Штелинг В.С., Захаренков А.В., Комов А.Т., Щербаков П.П.

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва

e-mail: smorchkovayv@mail.ru

На сегодняшний день одной из актуальных проблем энергетики является охлаждение высокотемпературных поверхностей при высоких плотностях теплового потока. Такая проблема, в частности, возникает при создании экспериментальных термоядерных энергетических установок. Одним из наиболее перспективных способов охлаждения высокотемпературной поверхности является использование диспергированной жидкости.

Целью работы является исследование теплоотдачи диспергированным потоком теплоносителя от высокотемпературной поверхности, нагреваемой тепловыми потоками высокой плотности. Созданный для исследования экспериментальный стенд моделирует энергонагруженные элементы термоядерных установок. Назначением экспериментального стенда является исследование возможности отвода тепловых потоков высокой плотности и термостабилизация в заданном интервале температур энергонагруженных конструктивных элементов.

На рис. 1 изображена принципиальная схема стенда. Визуальное наблюдение за процессом испарения проводится в герметичной камере (1), оснащённой смотровыми окнами из оптического стекла. В качестве источника нагрева используется индукционный нагрев при помощи ВЧ-генератора типа ВЧ-60АВ.

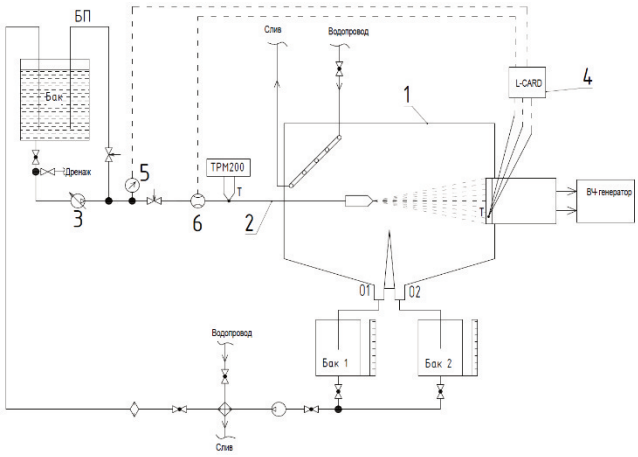


Рис. 1. Принципиальная схема стенда:
1 – экспериментальная камера, 2 – гидравлический контур, 3 – насос, 4 – система сбора информации L-CARD, 5 – измеритель давления,
6 – цифровой расходомер.

Рабочий участок в виде медного цилиндра диаметром 62 мм и впресованными в него с целью повышения магнитной восприимчивости 11-ю стальными (12×17) цилиндрами диметром 8 мм. Рабочий участок нагревается индукционным методом. Катушка индуктора охлаждается циркуляцией воды. Торец медного цилиндра является медной мишенью, теплосъем с которой осуществляется диспергированным потоком теплоносителя, генерируемым форсункой (см. Рис.2).

На рис. 2 представлена схема экспериментальной камеры, с конструкционными элементами, в том числе нагреваемый элемент (3) и медная мишень (5).

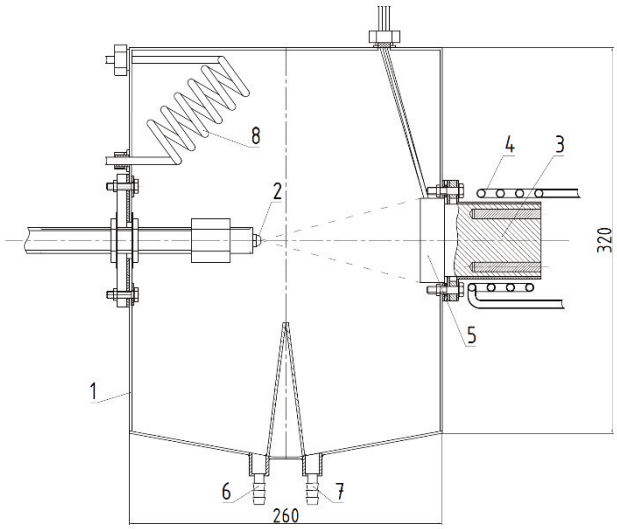


Рис. 2. Конструкция экспериментальной камеры:
1 – корпус, 2 – форсунка, 3 – нагреваемый элемент, 4 – индукционная катушка, 5 – медная мишень, 6, 7 – отборы, 8 – конденсатор.

На стенде проведено экспериментальное исследование нестационарного теплоотвода от мишени с температурой, превышающей температуру Лейденфроста. Получены кривые охлаждения, определены области эффективного теплообмена и диапазоны температур в которых должна осуществляться термостабилизация.

Получены первичные экспериментальные данные при стационарном теплообмене в следующем диапазоне режимных параметров теплоносителя: массовый расход воды $G_{\text{воды}}$ = 3÷20 г/с; давление воды $p_{\text{воды}}$ = (2,0÷4,0)·10^5 Па. Для получения результатов в максимально большом интервале режимных параметров использовались различные форсунки с идентичными параметрами распыла.

Анализ первичных результатов показал эффективность данного метода охлаждения.

Работа выполняется при поддержке гранта РНФ №16-19-10457

УДК 536.24

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА НА МОДЕЛИ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ С ШАРОВОЙ ЗАСЫПКОЙ

Тупотилов И.А.[1], Варава А.Н.[1], Дедов А.В.[1], Захаренков А.В.[1], Комов А.Т.[1], Локтионов В.Д.[1], Мирнов С.В.[1,2], Сморчкова Ю.В.[1]

[1]Национальный исследовательский университет «Московский Энергетический Институт», Москва
[2]АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк

e-mail: ZakharenkovAV@mpei.ru

Повышение уровня безопасности является одной из главных задач по эксплуатации ядерных установок. Перед атомной энергетикой стоят ряд основных проблем, такие как ядерная и радиационная безопасность реакторов, конкурентоспособность с тепловыми электрическими станциями, оснащенными парогазовыми установками (ПГУ), воспроизводство ядерного топлива, долговременное безопасное недорогое хранение радиоактивных отходов [1].

В большинстве реакторных установок атомных электрических станций (АЭС) используются стержневые твэлы. Основной недостаток таких тепловыделяющих сборок (ТВС) [1–3] заключается в сравнительно низких значениях удельной объёмной мощности реакторных установок и высоких температурах в центре твэлов. Практически все имеющиеся возможности для повышения удельной мощности РУ и понижения температуры топлива (повышения безопасности АЭС) при использовании традиционных ТВС исчерпаны.

Применение топлива в виде шаровых микротвэлов в реакторах типа ВВЭР позволяет существенно повысить безопасность АЭС. Шаровой микротвэл состоит из топливного ядра, покрытого защитной оболочкой. Оболочки разделяют топливо и теплоноситель и обеспечивают удержание продуктов деления ядер [1]. Микротвэлы из-за малого размера (диаметр 0,6–4,2 мм) имеют высокую удельную площадь поверхности и характеризуются низкой температурой топлива в центре твэла. Шаровые микротвэлы обладают низкой тепловой инерционностью [2]. Их оболочки не имеют швов, они прочные и стойкие, надежно удерживают продукты деления, могут работать при больших степенях выгорания топлива.

Исследованию гидродинамики и теплообмена в шаровой засыпке посвящено достаточно большое количество работ, но эксперименты в этих работах проводились в узких интервалах рабочих параметров, что приводит к необходимости проведения дополнительных исследований в этой области.

Целью данной работы является экспериментальное исследование гидродинамики и теплообмена на рабочих участках, представляющих собой цилиндрическую засыпку шаровых элементов.

На кафедре ОФиЯС в 2010 году собран и введен в эксплуатацию экспериментальный стенд для исследования гидродинамики и теплообмена в шаровых засыпках. Для проведения экспериментальных исследований была выполнена модернизация гидравлического контура, с целью установки в нем рабочего участка – масштабированной модели шаровой засыпки. Эскиз конструкции рабочего участка представлен на рис.1. Проведены экспериментальные исследования по определению потерь давления и коэффициента гидравлического сопротивления цилиндрической шаровой засыпки при следующих режимных параметрах теплоносителя: $p = (1{,}0 \div 5{,}0)$ МПа, $G = (0{,}05 \div 0{,}5)$ кг/с. Разработана технология монтажа, вывода и герметизации термопар (ТП) на рабочем участке.

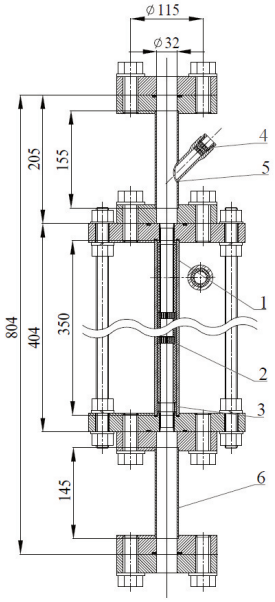


Рис. 1. Эскиз конструкции рабочего участка: 1 – радиопрозрачный керамический корпус рабочего участка, 2 – перфорированная решетка для удержания шаровой засыпки, 3 – прижимная пружина, 4 – узел уплотнения термопар, 5, 6 – подводящий и отводящий патрубки

В ходе обработки были выявлены и построены зависимости потерь давления от массовой скорости теплоносителя, а также гидравлического сопротивления засыпки шаровых элементов от числа Рейнольдса. Разработанные конструкция рабочего участка и методики позволяют проводить дальнейшие исследования при широком диапазоне режимных параметрах, в том числе при высоких давлениях.

Список литературы

1. Пономарев-Степной Н.Н., Кухаркин Н.Е., Хрулев А.А., Дегальцев Ю.Г. и др. 1999. Перспективы развития микротвэлов в ВВЭР. Атомная энергия. Т. 86. № 6. С. 443.
2. Гребенник В.Н., Н.Е. Кухаркин, Н.Н. Пономарев-Степной 2008. Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы – инновационное направление развития атомной энергетики. М: Энергоатомиздат. С. 47.
3. Гольцев А.О., Кухаркин Н.Е., Мосевицкий И.С., Пономарев-Степной Н.Н. 1993. Концепция безопасного корпусного водоводяного реактора степловыделяющими блоками на основе микротвэлов ВТГР. Атомная энергия. Т. 75. № 6. С. 417.

Работа поддержана РНФ (соглашение № 16-19-10457-П)

УДК 534;51-72

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ ВОДОГАЗОВОЙ СМЕСИ ПРИ АКУСТИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Фазлетдинов С.У., Питюк Ю.А., Фахреева Р.Р.

Центр микро- и наномасштабной динамики дисперсных систем,
Башкирский государственный университет, Уфа

Работа посвящена численному исследованию влияния акустического поля на фильтрацию водогазовой смеси (ВГС) в элементе пористой среды.

Рассматривается элемент пористой среды длинной 100м с пористостью 0.18. В исследуемом образце одновременно находятся нефть, вода с пузырьками газа и свободный газ (обозначены нижними индексами соответственно «o», «w», «b», «g»). Вытесняющей жидкостью является ВГС, которая может быть представлена как жидкость с эффективной проницаемостью [2]. Фазовые проницаемости для нефти, воды и газа определяются согласно [3]. В начальный момент времени образец пористой среды при пластовом давлении 200 атм. и температуре $70°C$ равномерно насыщен нефтью и водой с насыщенностями 0.8 и 0.2 соответственно. На левой границе элемента пористой среды закачивается ВГС с объемным содержанием пузырьков 0.1 при температуре 20^{o} и переменным забойным давлением, изменяющимся по гармоническому закону с амплитудой от 298 до 302 атм. На правой границе задаются постоянное давление 200 атм. и условие симметрии по насыщенности и температуре.

Численная методика основана на методе контрольного объема [1]. На основе разработанного программного модуля были проведены численные расчеты и анализ результатов математического моделирования. При фильтрации ВГС в образце пористой среды пузырьки расширяются. В связи с этим при превышении критического значения насыщенности пузырьков в ВГС они могут начать объединяться, образовывая свободную газовую фазу.

Для определения влияния периодического акустического поля на фильтрацию был проведен многопараметрический анализ вытеснения ВГС без акустического воздействия (0/40), с периодическим акустическим воздействием в течение 10 минут с перерывом в 30 минут (10/30) и в течение 20 минут с перерывом в 20 минут (20/20). Рассматривалось 6 периодов воздействия в течении четырех часов закачки. Обнаружено, что при большем времени акустического воздействия пузырьковая жидкость (Рис.1б) лучше вытесняет нефть (Рис.1а).

Также исследован остаточный эффект акустического поля при водогазовом воздействии путем численного анализа вытеснения ВГС без акустического поля, с периодическим акустическим полем в течение 10 минут с перерывом 30 минут в первые два часа закачки и в течение четырех часов. Рассматривалось три периода периодического акустического воздействия во втором случае и шесть периодов – в третьем случае. Обнаружено, что при двух часах периодического воздействия и далее двух часах простоя остаточная нефтенасыщенность оказалась меньше, чем при фильтрации без использования акустического поля, что свидетельствует о наличие остаточного эффекта от акустического воздействия на пласт. Многопараметрический анализ на изменение амплитуды акустического поля показал, что водогазовое воздействие наиболее эффективно при большей амплитуде.

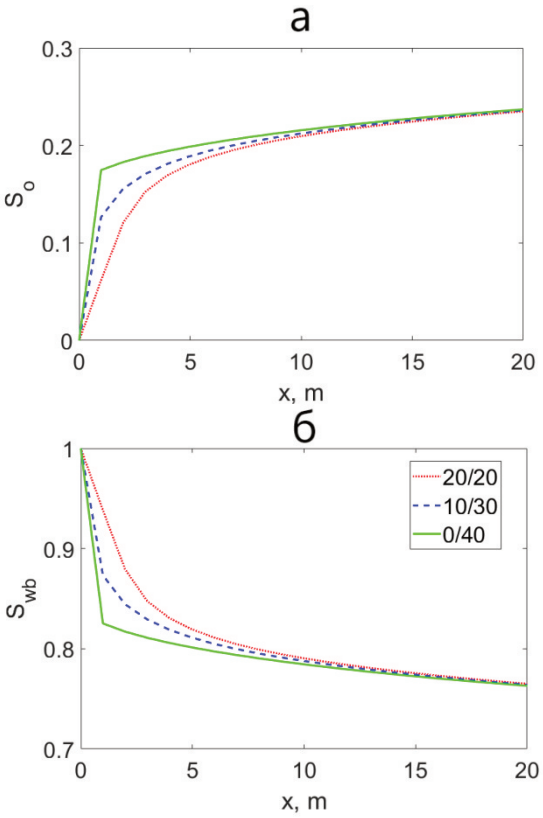


Рис. 1. Остаточная нефтенасыщенность (а) и насыщенность ВГС (б) в образце при различном времени акустического воздействия через четыре часа после закачки

Проведенные исследования показывают влияние акустического поля на фильтрацию ВГС. Проведенный анализ подтверждает эффективность и целесообразность применения акустического воздействия на нефтяной пласт при вытеснении нефти пузырьковой жидкостью.

Список литературы

1. Патанкар С. В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. Пер. с англ. М. Энергоатомиздат. 1984. 152 с.
2. Сулейманов Б.А. Особенности фильтрации гетерогенных систем. М.-Ижевск. 2006. 356 с.
3. Чарный И.А. Подземная гидрогазодинамика. М.: Гостоптехиздат. 1963. 396 с.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-20102

УДК 532.613.5

ВЛИЯНИЕ КОНВЕКЦИИ НА ПОЛОЖЕНИЕ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОСТИ НА ЗЕМЛЕ И В НЕВЕСОМОСТИ

Федюшкин А.И.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

e-mail: fai@ipmnet.ru

В данной работе на основе численного моделирования показано влияние термокапиллярной и гравитационной конвекций на деформацию и положение границы раздела в двухслойной системе "воздух-вода" при внезапном боковом нагреве.

Постановка задачи. Рассмотрены задача о влиянии внезапного нагрева двухслойной системы «воздух-вода» в квадратной полости с границами без трения (с проскальзыванием) на форму границы раздела при термокапиллярной конвекции без гравитационной конвекции (ускорение силы тяжести g=0) и с наличием гравитационной конвекции (g≠0). Схема модели представлена на рис. 1.)

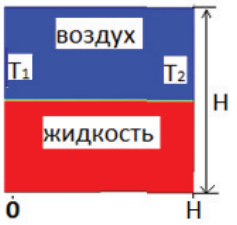
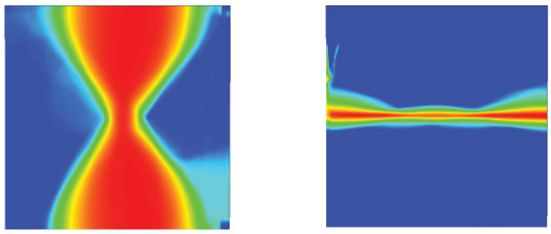


Рис.1 Схема расчетной области и начальное распределение фаз.

Математическая модель основана на системе уравнений Навье-Стокса для двухфазной системы «воздух–вода». В начальный момент граница раздела плоская и горизонтальная. Вода занимает половину области, как показано на рис.1. Граничные условия на поверхности раздела «вода–воздух» в виде равновесия поверхностных сил и давления. Моделирование изменения формы границы раздела «воздух–вода» выполнялось, используя VOF-модель жидких объемов (*Volume Of Fluid* метод).

Точность определения границы ограничивается размером ячеек сетки и методами решения, поэтому использовалась подробная динамическая сетка по обе стороны интерфейса. Численное моделирование проводилось на основе решения нестационарных уравнений Навье-Стокса для двухфазной несжимаемой системы «воздух–вода» с использованием модели «смеси» и методов второго и третьего порядка точности по пространству и второго по времени с неявным матричным (совместным – couple) решением уравнений. Задача характеризуются геометрическими параметрами, относительными величинами свойств данной двухслойной системы и следующими безразмерными числами: Марангони $\mathrm{Ma}=\beta_\sigma H\Delta T/\nu\rho a$, Рэлея $\mathrm{Ra}=g\beta\Delta T H^3/\nu a$, Прандтля $\mathrm{Pr}=\nu/a$, где σ, β, ν, a – коэффициенты поверхностного натяжения, теплового расширения, кинематической вязкости и температуропроводности; $\beta_\sigma=-\partial\sigma/\partial T$; H, ΔT – масштабы геометрии и температуры.

Результаты математического моделирования. Рассмотрим случай только с термокапиллярной конвекцией (g=0) рис.1. В начальный момент температура одинаковая. При мгновенном изменении разницы температур между вертикальными стенками, на поверхности раздела возникает термокапиллярная конвекция. Вследствие этого свободная поверхность раздела искривляется и осциллирует во времени. Воздух и вода прогреваются, возникает термокапиллярная конвекция, режим которой при больших числах Марангони приобретает колебательный характер и является неустойчивым. Поскольку отсутствуют сила тяжести и сила напряжения на всех боковых стенках области, то при малейших возмущениях поверхность раздела может изменить положение (от горизонтального до вертикального).



а) б)

Рис.2. Изолинии отклонений от среднего положения интерфейса (усреднённые по времени на интервале от t=0 до t=5сек) $Ma=10^6$, а) - $Ra=0$, б) - $Ra=10^7$.

Интерфейс после потери устойчивости около горизонтального положения совершает колебания около вертикали. Изотермы после прогрева приобретают преимущественно вертикальное направление и интерфейс, поворачиваясь на 90 градусов от начального, принимает энергетически выгодное, преимущественно вертикальное положение (подстраиваясь вдоль изотерм). Интерфейс совершает колебания, но в среднем его положение остается вертикальным. На рис.2 показаны изолинии отклонений от среднего положения интерфейса усреднённые по времени на интервале времени от t=0 до t=5сек ($\mathrm{Ma}=10^6$, *а*) – $\mathrm{Ra}=0$, б)– $\mathrm{Ra}=10^7$). Гравитационная конвекция ($\mathrm{Ra}=10^7$), даже при наличии термокапиллярной конвекции ($\mathrm{Ma}=10^6$), обладает стабилизирующим фактором для положения свободной границы, то есть свободная граница слабо колеблется, но в среднем остается преимущественно горизонтальной (близкой к равновесному положению: тяжелая вода – внизу).

Выводы. При боковом нагреве двухслойной системы «воздух-вода» в объеме со свободными стенками, граница раздела за счет термокапиллярной конвекции может поворачиваться на 90° и принимать устойчивое (энергетически выгодное) положение, параллельное нагреваемой стенке (изотермам). Гравитационная конвекция (даже при наличии термокапиллярной конвекции) обладает стабилизирующим фактором для установления свободной границы в горизонтальном положении.

Работа поддержана госпрограммой тема № АААА-А20-120011690131-7

УДК 532.51

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ РЕЖИМОВ ПРИ ПРОТИВОТОЧНОМ ТЕЧЕНИИ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ И ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА ГАЗА

Цвелодуб О.Ю.

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

e-mail: tsvel@itp.nsc.ru

Одним из плодотворных модельных подходов при рассмотрении совместного течения пленки жидкости, стекающей по вертикальной поверхности, и турбулентного потока газа является разделение задачи на два этапа. Сначала рассматривается течение газа над искривленной поверхностью раздела, которую часто можно считать жесткой и неподвижной. В ней вычисление напряжений газа на поверхности раздела сводится к рассмотрению отдельных пространственных гармоник. На втором этапе исследуются нелинейные волновые режимы на поверхности пленки жидкости. В [1] для спутного течения в случае малых расходов жидкости для возмущений малой, но конечной амплитуды было получено два модельных уравнения на отклонение толщины пленки от невозмущенного уровня. В настоящей работе аналогичная модельная система уравнений получена для противоточного течения газа и жидкой пленки. В расчетах, представляемых ниже, использовались данные о пульсациях трения на границе раздела пленка–газ, полученные в [2] по квазиламинарной модели Бенджамина [3]. Учитывая что, при этом возмущенная граница считалась неподвижной, для того, чтобы этими данными можно было воспользоваться без перерасчетов, ось *x* направлена по течению газа, т.е. вверх. В случае малых расходов жидкости (Re~1) данная задача сводится к рассмотрению одного эволюционного уравнения на толщину пленки [1]. В выбранной системе координат оно имеет вид

$$h_t-\frac{\mathrm{Re}}{Fr}h^2h_x+\tau_0\,\mathrm{Re}\,hh_x+\varepsilon\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\varepsilon\,\mathrm{Re}W}{3}h^3h_{xxx}+\right.$$
$$\left.+\frac{2\,\mathrm{Re}^3}{15Fr^2}h^5h_x(1-\tau_0Fr)+\frac{\mathrm{Re}\,\tau_0}{2}h^2\int\hat{h}_k k\tau(k)e^{ikx}dk\right)=0. \qquad (1)$$

Здесь $\mathrm{Re}=\rho h_0u_0/\mu$ – число Рейнольдса, $W=\sigma/\rho l_0u_0^2$ – число Вебера, $Fr=u_0^2/gh_0$ – число Фруда, $\varepsilon=h_0/l_0$ – отношение характерной толщины пленки h_0 к характерному продольному размеру возмущений l_0.

Ограничиваясь рассмотрением возмущений малой, но конечной амплитуды и вводя медленное и быстрое времена, с помощью преобразования $h=1+\varepsilon h_1$, $t_0=t$, $t_1=\varepsilon t$, из уравнения (1) получаем

$$\frac{\partial h_1}{\partial t_0}-\frac{\mathrm{Re}}{Fr}(1-\tau_0Fr)\frac{\partial h_1}{\partial x}=0, \qquad (2)$$

$$\frac{\partial h_1}{\partial t_1}-\frac{\mathrm{Re}}{Fr}(2-\tau_0Fr)h_1\frac{\partial h_1}{\partial x}+\frac{\varepsilon\,\mathrm{Re}W}{3}\frac{\partial^4h_1}{\partial x^4}+$$
$$+\frac{2\,\mathrm{Re}^3}{15Fr^2}(1-\tau_0Fr)\frac{\partial^2h_1}{\partial x^2}+\frac{\mathrm{Re}\,\tau_0}{2}\int i\hat{h}_{1k}k^2\tau(k)e^{ikx}dk=0. \qquad (3)$$

Из уравнения (2) следует, что в первом приближении (на быстрых временах) возмущения малой, но конечной амплитуды, распространяются с характерной постоянной скоростью $c_0=\mathrm{Re}(\tau_0-1/Fr)$. В этом приближении движение происходит без изменения начальной формы возмущений. Уравнение (3) описывает нелинейную эволюцию возмущений на больших временах.

Показано, что в зависимости от соотношения между числом Фруда (Fr) и безразмерного напряжения трения на невозмущенной границе раздела (τ_0) задача сводится к нескольким различным моделям. Основное внимание в работе уделяется случаю, когда $0<\tau_0Fr<1$. При таких значениях параметров волна в первом приближении (см. уравнение (2)) бежит вниз. В этой ситуации уравнение (3), после соответствующих преобразований переписывается в виде

$$\frac{\partial H}{\partial t}-2H\frac{\partial H}{\partial x}+\frac{\partial^2H}{\partial x^2}+\frac{\partial^4H}{\partial x^4}+B\int_{-\infty}^{\infty}ik^2\tau(k)\hat{H}(k,t)e^{ikx}dk=0.$$

Здесь *B* – комплекс, в котором содержатся параметры задачи.

Численно построены несколько характерных решений для этого уравнения.

Список литературы

1. Цвелодуб О.Ю., Архипов Д.Г. Моделирование нелинейных волн на поверхности тонкой пленки жидкости, движущейся под действием турбулентного потока газа. ПМТФ. 2017. Т. 58. № 4. С. 56–67.
2. Вожаков И.С., Архипов Д.Г., Цвелодуб О.Ю. Моделирование нелинейных волн на поверхности тонкой пленки жидкости, увлекаемой турбулентным потоком газа. Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22. № 2. С. 201–212.
3. Benjamin T.B. Shearing flow over a wavy boundary. J. Fluid Mechanics. 1959. V. 6. P. 161–205.

Работа поддержана РНФ (грант № 16-19-10449)

УДК 532.5

ТЕПЛООБМЕН В МИНИКАНАЛЕ С ЛОКАЛЬНЫМ ГЛАДКИМ НАГРЕВАТЕЛЕМ СОЗДАННОГО НА БАЗЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Элоян К.С.[1], Роньшин Ф.В.[1,2], Литвинцева А.А.[1], Чеверда В.В.[1,2]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
[2] Новосибирский государственный университет

e-mail: karapet8883@gmail.com

Одним из перспективных направлений по отведению высоких тепловых потоков является двухфазные системы с использованием расслоенного и кольцевого режима течения. Существующие работы показывают эффективность использования двухфазных систем, в котором искусственно создаётся расслоенный режим течения. При таком режиме достигаются высокие значения коэффициенты теплоотдачи при низких перепадах давления.

Для реализации высокоэффективных систем охлаждения широко применяются различные технологии создания и обработки. Одним из ключевых направлений развития современного промышленного производства являются использование машин, в основе работ которых лежат аддитивные технологии. Данная технология производства позволяет создавать объекты со сложной геометрической структурой на поверхности с широким спектром материалов и с высокой точностью. Используя аддитивные технологии, становится возможным создавать объекты, которые невозможно создавать при помощи традиционных технологий и значительно сократить производственный цикл. Аддитивные технологии могут стать ключом к развитию и созданию систем охлаждения нового поколения со сложной структурой и формой.

В данной работе представлены результаты первых экспериментов по исследованию тепломассообмена в миниканальной двухфазной системе: плёнка жидкости, движущаяся под действием газа с использованием локального нагревателя, поверхность которого была изготовлена с помощью аддитивных технологий. Расслоенный режим был реализован в миниканале прямоугольного сечения (30х0,8 мм^2), длина канала составляет 50 мм. В нижнюю стенку из нержавеющей пластины был вмонтирован нагревательный элемент с гладкой поверхностью и шероховатость которого достигает 40-50 мкм без дополнительных механических обработок поверхности. Размер нагревателя 10х10мм^2. Нагревательный элемент изготовлен с помощью 3D принтера по металлу EOS M 290. Композит алюминиевого порошка использовался в качестве материала, из которого был изготовлен гладкий нагревательный элемент. Измерены основные характеристики образца. Теплопроводность материала составляет порядка 170-180 Вт/м*К. Шероховатость поверхности нагревательного элемента составляет 40 мкм. В качестве рабочей жидкости использовалась вода, в качестве рабочего газа – азот. Для контроля расхода газа были использованы массовые регуляторы расхода Bronkhorst. Для контроля температуры, измерения критического теплового потока были вмонтированы термопары в нагревательный элемент. Для оценок растечек тепла были вмонтированы термопары по периметру нагревательного элемента в нержавеющую пластину.

Были проведены экспериментальные исследования теплообмена в двухфазной системе с малыми расходами жидкости и газа. Приведенная скорость (U_{sq}) газа менялась в пределах от 3,5 м/с до 17,4 м/с. Приведённая скорость жидкости менялась от 0,0145 до 0,0204 м/с. Была проведена визуализация с помощью камеры с высоким разрешением, а также с помощью ИК камеры были получены изотермы поверхности канала. Кризис теплообмена детектировался за счёт резкого изменения значений температур на термопарах, встроенных в нагреватель и с помощью визуализации. На рис. 1 отчётливо видно практически полное осушение нагреваемой поверхности. При дальнейшем увеличении теплового потока, происходит полное осушение поверхности нагревателя, и вся жидкость начинает обтекать зону с локальным нагревом.

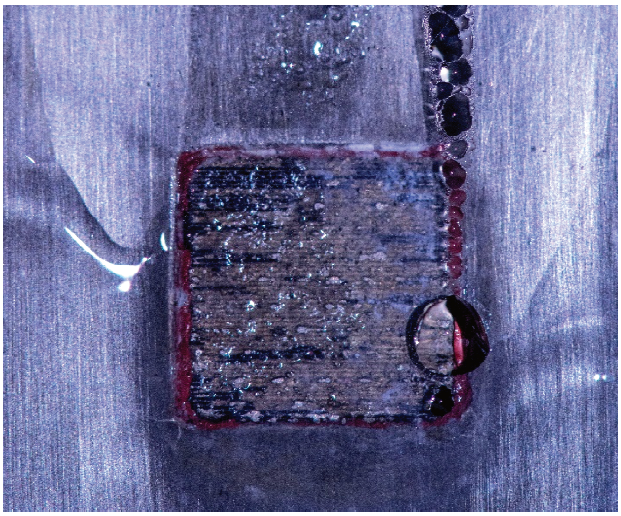


Рис. 1. Фотография перед кризисом в двухфазной системе с локальным гладким источником нагрева, изготовленного с помощью аддитивных технологий. U_{sq} = 12,5 м/с, U_{sl} = 0,0204 м/с, общая мощность нагревателя Q_{cr} = 78,7 Вт.

Список литературы

1. Bar-Cohen T.A., Holloway C. Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 745. P. 022002.
2. Hirokawa T., Ohta H. and Kabov O. Interfacial Phenomena and Heat Transfer. 2015. V. 3. P. 303
3. Mudawar I., Qu W. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2004. V. 47. P. 2045.
4. Kabov O.A., Lyulin Yu.V., Marchuk I.V., Zaitsev D.V. International Journal of Heat and Fluid Flow. 2007. V. 28. P. 103.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (соглашение № 18-79-10258)

УДК 532.54

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАМИНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ СО ВЗВЕШЕННЫМИ ТВЕРДЫМИ ЧАСТИЦАМИ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ ПРИ НАЛИЧИИ УТЕЧКИ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ВЕРХНЮЮ ГРАНЬ

Юлмухаметова Р.Р., Мусин А.А., Ковалева Л.А.

Башкирский государственный университет, Уфа

e-mail: Regina.you@mail.ru

Течение суспензий в каналах встречаются во многих областях промышленности. Но несмотря на их широкое применение, свойства суспензий до сих пор не могут быть должным образом предсказаны с помощью единой численной модели. В случае, когда суспензия содержит частицы с плотностью выше, чем жидкость, они имеют тенденцию оседать и накапливаться по длине канала. При работе с такими суспензиями необходимо учитывать ряд переменных, таких как характеристики течения, поведение потока в каналах различной геометрии, а также концентрацию частиц, форму, размер и распределение по размерам. Для концентрированных суспензий при моделировании важно также учитывать такие явления, как взаимодействие между частицами, между частицами и стенками, миграция частиц, режим течения, а также подъемные силы.

Рассматривая подходы к моделированию течения суспензий можно выделить 2 подхода: одножидкостный и двухконтинуальный [1, 2].

Различия между односкоростной моделью и двухконтинуальной моделью являются существенными, однако для большинства практических целей решение полной системы из двухскоростных моделей не только требует вычислительных затрат, но и не является необходимым. Авторами статьи [2] отмечено то, что, когда устойчивые течения характеризуются малостью времени динамической релаксации частиц по сравнению с гидродинамическим временем или малостью числа Стокса, перенос частиц имеет диффузионный характер. Диффузионная модель суспензии применима для моделирования различных ламинарных потоков суспензии в приближении Стокса.

В данной работе моделируется течение дисперсной системы, состоящей из твердых сферических частиц и вязкой несжимаемой жидкости, в канале прямоугольного сечения при наличии утечки несущей жидкости различной интенсивности через верхнюю грань канала (см. рис. 1). Считается, что жидкость несжимаема, твердые сферические частицы одинакового размера, течение ламинарное.

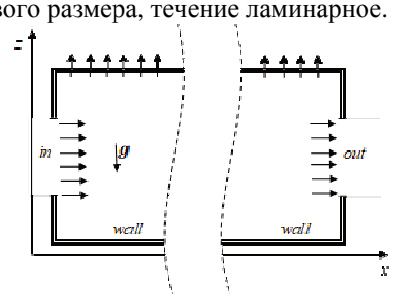


Рис. 1. Схема расчетной области.

Математическая модель включает в себя осредненные уравнения сохранения массы и количества движения для дисперсной фазы и дисперсионной среды, записанные с учетом влияния гравитационных сил. В начальный момент времени канал был заполнен чистой жидкостью, система находилась при атмосферном давлении в состоянии покоя.

Результаты численного моделирования, полученные ранее с помощью упрощенной математической модели, были проанализированы и сравнены с экспериментальными данными в работе [3]. Результаты моделирования качественно описывали экспериментальные данные. В последствии математическая модель была модифицирована в соответствии с моделью, предложенной в работе [2].

Решение системы уравнений математической модели осуществлено методом контрольных объемов в программном комплексе OpenFoam. Проведено исследование течения вязкой несжимаемой жидкости со взвешенными твердыми сферическими частицами в канале прямоугольного сечения при наличии утечки через верхнюю грань (см. рис. 2).

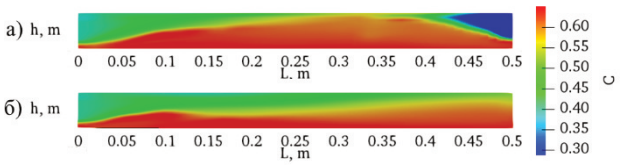


Рис. 2. Распределение концентрации частиц вдоль канала для разных значений соотношений расходов на входе в канал и на верхней грани: а – 1:1, б – 10:1.

Строится зависимость величины осевшего слоя от соотношений расходов на входе и на верхней грани канала, а также физических параметров суспензии.

Список литературы

1. Боронин С.А., Осипцов А.А. Двухконтинуальная модель течения суспензии в трещине гидроразрыва. Док. АН. 2010. Т. 431. № 6. С. 758–761.
2. Гаврилов А.А., Шебелев А.В. Одножидкостная модель смеси для ламинарных течений высококонцентрированных суспензий. Изв. РАН. МЖГ. 2018. № 2. С. 84–98.
3. Zamula Yu.S., Iulmukhametova R.R., Musin A.A., Shashkov A.V., Kovaleva L.A. Experimental and numerical modeling of a viscous incompressible fluid flow with dispersed particles in a rectangular channel. Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1359. 012039. P. 6.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-31-90157

УДК 536.24

ФОРМИРОВАНИЕ ЗАМКНУТОЙ ПАРОВОЙ ПЛЕНКИ ПРИ КИПЕНИИ ГЕЛИЯ II НА ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ НАГРЕВАТЕЛЕ ВНУТРИ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ

Ячевский И.А., Королёв П.В., Пузина Ю.Ю., Крюков А.П.

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

e-mail: pttoftw@gmail.com

Решение проблем, связанных с ролью термического сопротивления межфазной поверхности пар-жидкость в процессах теплопереноса при кипении, требует детального понимания закономерностей формирования замкнутых стационарных паровых пленок на нагревателях, окруженных пористыми оболочками. Известно, что стационарное пленочное кипение гелия-II в условиях невесомости можно обеспечить за счет пористых структур, удерживающих гелий-II вблизи греющих поверхностей и своим гидравлическим сопротивлением создающих замену гидростатическому напору, практически отсутствующему при микрогравитации. Кроме того, в процессе изучения проблемы были выявлены особенности кипения He-II в стесненных условиях, делающие исследования такого рода не только необходимыми для планирующихся опытов на орбите, но и представляющими самостоятельную ценность. Наличие невесомости требуется для сохранения симметрии паровых образований на цилиндрических и сферических нагревателях даже при больших значениях толщин пленок (относительно диаметров нагревателей). В наземных условиях достичь такого результата невозможно. Для проведения исследований по данной тематике на кафедре Низких Температур НИУ «МЭИ» была смонтирована установка с экспериментальной ячейкой, подробное описание которой представлено в [1, 2]. Эксперименты, проведенные ранее на этой установке, позволили получить данные по кипению гелия-II на цилиндрическом нагревателе в «большом» объеме, в стесненных условиях в полости внутри ячейки с пористой оболочкой, а также в ячейке, частично сообщающейся с объемом сверхтекучего гелия в сосуде Дьюара. Во всех этих экспериментах внутри ячейки наблюдалось только «шумовое» кипение He-II с «раскрытой», т.е. незамкнутой паровой пленкой на греющей поверхности [3].

В данной работе представлены результаты эксперимента, в котором впервые была получена замкнутая паровая пленка на цилиндрическом нагревателе диаметром 3 мм и длиной 30 мм, находящимся внутри вышеупомянутой ячейки с цилиндрической пористой структурой. В процессе эксперимента постоянство давления паров в криостате достигалось за счет откачки паров He-II. После того как температура жидкого гелия опускалась до 1.6 K, подавалась нагрузка на нагреватель. Температура нагревателя в процессе отслеживалась с помощью терморезистивных датчиков, закрепленных на его поверхности. Таким образом удалось получить замкнутую, имеющую почти постоянную толщину, паровую пленку на поверхности нагревателя.

Картина, наблюдавшаяся в одном из таких экспериментов, представлена на рис. 1. Давление паров гелия в криостате – 15 мм. рт. ст., удельная тепловая нагрузка на нагревателе около 10^4 Вт/м^2. После начала кипения за счет изменения подаваемой нагрузки температуру на поверхности нагревателя удавалось поддерживать на постоянном уровне 18 K. В результате через смотровые окна на торцах экспериментальной ячейки можно было видеть замкнутую паровую пленку.



Рис.1. Замкнутая паровая пленка He-II на поверхности цилиндрического нагревателя, вид с торца нагревателя.

Таким образом, показано, что внутри ячейки с пористой оболочкой можно наблюдать пленочное кипение сверхтекучего гелия с замкнутой паровой пленкой, хотя во всех предыдущих экспериментах такого рода удавалось получить только режим кипения с незамкнутой пленкой пара. Дальнейшие исследования предполагается посвятить поискам теоретического объяснения самого факта существования различных режимов кипения He-II в стесненных условиях.

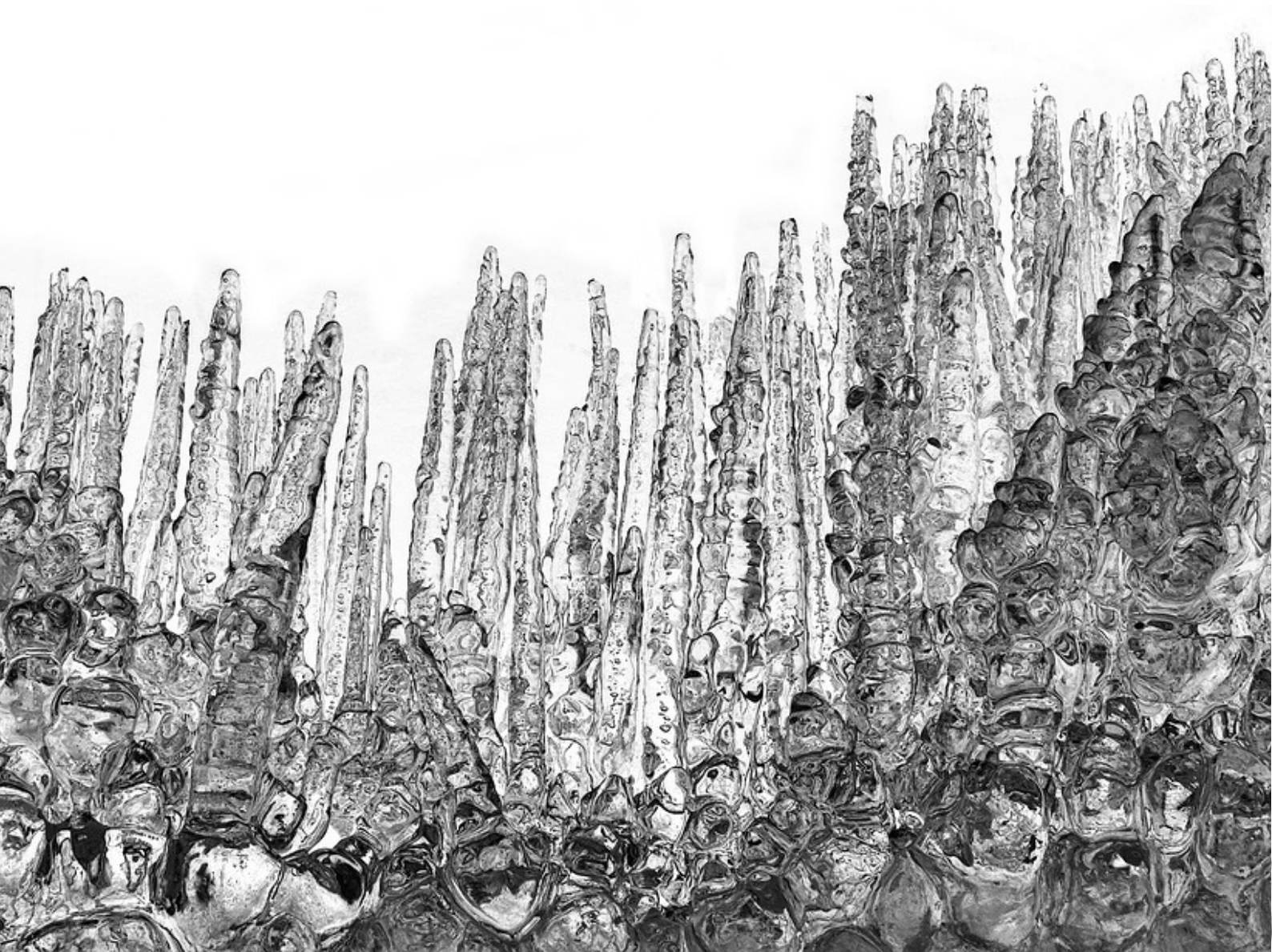
Список литературы

1. Королев П.В., Крюков А.П., Пузина Ю.Ю. Экспериментальное исследование кипения сверхтекучего гелия (He-II) внутри пористого тела. // Прикладная механика и техническая физика. 2017. Т. 58. № 4. С. 126–134.
2. Королев П.В., Крюков А.П., Пузина Ю.Ю. Конструкция экспериментальной ячейки для исследования кипения гелия-II в условиях невесомости. // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. 2012. Т. 130. №. 5. С. 43–50.
3. P.V. Korolyov and I.A. Yachevsky An experiment on He-II film boiling inside the porous structure. // Journal of Physics: Conf. Series. 2018. V. 1128. P. 012050.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект № 19-19-00321)



СЕКЦИЯ 3
Фазовые переходы



УДК 536.421

МЕТАСТАБИЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ И ИХ УСТОЙЧИВОСТЬ ПРИ ФАЗОВОМ ПЕРЕХОДЕ ЖИДКОСТЬ–КРИСТАЛЛ

Байдаков В.Г.

Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург

e-mail: baidakov@itp.uran.ru

Фазовые переходы первого предполагают наличие метастабильных состояний. При переходе жидкость – кристалл такими состояниями являются переохлажденная жидкость и перегретый кристалл. Качественные различия в симметрии конкурирующих фаз приводят к качественным отличиям в устойчивости этих метастабильных состояний. Если метастабильная кристаллическая фаза понижает термодинамическую (длинноволновую) устойчивость по мере ее перегрева (растяжения), то переохлажденная жидкость сохраняет свою восстановительную реакцию на длинноволновые возмущения плотности до абсолютного нуля температур. Спинодаль, как линия неограниченно большой сжимаемости, у переохлажденной жидкости отсутствует [1].

Метастабильные жидкости и кристалл могут находиться и при отрицательных давлениях. Здесь возможно равновесное сосуществование этих фазовых состояниях на плоской межфазной границе, т.е. линия фазового равновесия кристалл–жидкость имеет метастабильное продолжение за тройной точкой. В отличие от линии фазового равновесия жидкость–газ, которая ограничена со стороны высоких температур критической точкой и имеет метастабильное продолжение до температуры абсолютного нуля, линия плавления не ограничена при высоких температурах (давлениях). Равновесие кристалл–жидкость заканчивается в точке встречи метастабильного продолжения линии плавления со спинодалью растянутой жидкости – конечной точке линии плавления [2].

В молекулярно-динамических (МД) экспериментах исследована устойчивость леннард-джонсовских жидкости и кристалла относительно бесконечно малых и конечных возмущений параметров состояния. Расчеты проведены в широком интервале температур и давлений, включая отрицательные. Исследуемые системы содержали от 5 324 до 1 000 188 частиц, которые размещались в кубической ячейке с периодическими граничными условиями. Использовался пакет параллельного (МД) моделирования LAMMPS. Расчеты проводились в *NPT*– и *NVT*– ансамблях.

Определены статический и динамический структурные факторы переохлажденной жидкости. Показано, что упругость жидкости по отношению к коротковолновым возмущениям (длиной волны порядка межмолекулярных расстояний) с понижением температуры уменьшается, в то время как длинноволновая упругость растет. Исследования динамического структурного фактора позволили выявить наличие в переохлажденной жидкости коллективной моды, частота которой уменьшается с понижением температуры. Установлено, что этот результат не означает существование в переохлажденной жидкости мягкой моды. При низких температурах происходит застекловывание жидкости, сопровождающееся сильным ростом времени релаксации. Это проявляется в уменьшение полуширины квазиупругого пика динамического структурного фактора.

Рассчитаны изотермические модули упругости c_{11}, c_{12}, c_{44} леннард-джонсовского ГЦК кристалла. По полученным данным аппроксимирована спинодаль кристалла. Показано, что при температурах выше температуры конечной точки линии плавления кристалл теряет свою устойчивость на подступах к спинодали. Ниже конечной точки кристалл сохраняет термодинамическую устойчивость и когда его плотность меньше плотности спинодали, причем, чем ниже температура, тем в системах большего числа частиц может быть осуществлен переход через спинодаль.

Исследована кинетика кристаллизации и плавления в метастабильных леннард-джонсовских системах. Методом среднего времени жизни определены частоты нуклеации. Результаты расчетов сопоставлены с классической теорией гомогенной нуклеации в макроскопическом приближении. Из теории гомогенной нуклеации по МД данным о частоте зародышеобразования рассчитаны значения поверхностной свободной энергии критических зародышей. Показано, что поверхностная свободная энергия критического зародыша при плавлении меньше, чем на плоской межфазной границе. Для температуры, в два раза меньшей температуры тройной точки, расхождения в значениях поверхностной свободной энергии на плоской и искривленной межфазной границах составляют 40–65 %. Радиусы критических полостей, выраженные через размерный параметр потенциала, здесь 0.25–0.7, что хорошо согласуется с их прямыми оценками в процессе МД моделирования.

Размерная зависимость поверхностной свободной энергии критических зародышей при кристаллизации переохлажденной жидкости определена методом метадинамики. В качестве коллективных переменных использованы параметры порядка Стейнхардта и потенциальная энергия системы. Показано, что в условиях постоянства давления поверхностная свободная энергия кристаллических зародышей в области положительных давлений превышает ее значение на плоской межфазной границе.

Список литературы

1. Скрипов В.П., Байдаков В.Г. Переохлажденная жидкость – отсутствие спинодали // ТВТ. 1972. Т. 10. № 6. С. 1226–1230.
2. Baidakov V.G., Protsenko S.P. Singular point of a system of Lennard-Jones particles at negative pressures // Phys. Rev. Lett. 2005. V. 95. No 1. P. 015701.

Работа поддержана РФФИ (грант № 18-08-00403)

УДК 631.1+548.562

ТЕРМИЧЕСКОЕ РАСШИРЕНИЕ ГИДРАТОВ ВОДОРОДА НА ОСНОВЕ ЛЬДА

Белослудов В.Р.[1,2], Жданов Р.К.[1,2], Гец К.В.[1,2], Божко Ю.Ю.[1,2], Субботин О.С.[1,2]

[1] Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск
[2] Новосибирский государственный университет

e-mail: bel@niic.nsc.ru

Клатратные гидраты – это соединения включения, которые образуются помещениеммолекул-гостей в полости каркаса-хозяина, состоя-щего из молекул воды. Данные соединения известныуже очень давно, но до сих пор активно изучаютсякак экспериментальными, так и теоретическими ме-тодами. Молекулы водорда несмотря на свой очень малый размер способны образовывать клатратные гидраты кубической структуры II при этом многократно заполняя большие полости. В работах Намиота [1] было показано, что из-за своего малого размера молекулы водорода также способны заполнять пустоты в структуре льда Ih, тем самым, образуя гид-рат водорода на основе льда. При дальнейшем повышении давления происходит переход к структуре классического гидрата КС-II [2]. Затем следует переход к заполненной водородом структуре льда II [3] и при еще большем повышении давлении в гидрата водорода на основе льда Ic [3, 4].

При исследовании газовых гидратов, было экспериментально обнаружено, что для гидратов, образованных из некоторых газов, наблюдается аномально низкая скорость диссоциации при выводе их зоны существования, в последствии данный феномен стал называться эффектом самоконсервации [5]. Использование этой особенности гидратов в промышленности способно значительно увеличить целесообразность их применения, что особо актуально для продвижения экологически чистой энергетики.

Ранее нами исследовался эффект самоконсервации гидратов водорода [6]. Основным фактором, ответственным за данный эффект нами предполагается различие коэффициента линейного термического расширения гидрата и льда. Т.к. на начальной стадии при выведении гидрата из области термодинамической стабильности на поверхности гидрата образуется слой льда Ih, который из-за отличного от гидрата коэффициента термическо расширения создает дополнительное давление, которое эффективно возвращает гидрат обратно в область стабильности. Однако, в той работе не была учтена возможность образования помимо обычного льда Ih гидрата на основе льда Ih, что может иметь значительный эффект.

В данной работе производилось теоретическое исследование эффекта самоконсервации гидратов водорода с учетом возможности включения молекул водорода в каналы льда Ih. Исследование проводилось при помощи комбинации методов молекулярной динамики, реализованном в пакете LAMMPS, методов решеточной динамики, реализованных в оригинальном программном обеспечении, созданном авторами данной работы и оригинальной статистическо-термодинамической моделью соединений включения [6], основанной на хорошо известной моделе Ван-Дер-Ваальса и Платтью.

Согласно проведенным расчетам было получено, что включение молекул водорода в лед значительно влияет на коэффициент расширения льда Ih. При этом эффект сопоставим с эффектом включениям молекул водорода или метана в пустую решетку классического клатратного гидрата. Таким образом, можно говорить о том, что учет возможности заполнения льда водородом почти не сказывается на эффекте самоконсервации гидрата водорода, однако, позволяет говорить о потенциальной возможности самоконсервации гидратов водорода на основе льда используя аналогичный подход. Методы молекулярной динамики показали наличие сплошной сетки водородных связей на границе раздела фаз.

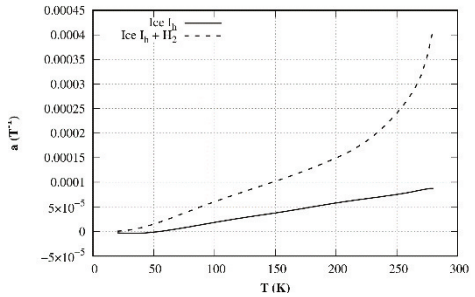


Рис. 1. Зависимость коэффициента линейного расширения от температуры льда Ih и льда Ih со включенным водородом.

Список литературы

1. Намиот А.Ю., Бухгалтер Э.Б. Клатраты газов во льду // Журнал Структурной Химии. 1965. В. 6(6) С. 911–912.
2. Mao W.L., Mao H.K., Goncharov A.F., Struzhkin V.V., Guo Q., Hu J., Shu J., Hemley R.J., Somayazulu M., Zhao Y. Hydrogen Clusters in Clathrate Hydrate // Science. 2002. V. 297 (5590). P. 2247–2249.
3. Vos W.L., Finger L.W., Hemley R.J., Mao H.K. Novel H2-H2O clathrates at high pressures // Phys. Rev. Lett. 1993. V. 71, P. 3150.
4. Vos W.L., Finger L.W., Hemley R.J., Mao H.K. Pressure dependence of hydrogen bonding in a novel H2O-H2 clathrate // Chem. Phys. Lett. 1996. V. 257(5). P. 524.
5. Stern L.A., Circone S., Kirby S.H., Durham W.B. Anomalous preservation of pure methane hydrate at 1 atm. // J. Phys. Chem. B. 2001. V. 105. P. 1756–1762.
6. Belosludov R.V., Bozhko Y.Y., Zhdanov R.K., Subbotin O.S., Kawazoe Y., Belosludov V.R. Hydrogen hydrates: Equation of state and self-preservation effect // Fluid Phase Equilibria. 2016. V. 413. P. 220–228.

Работа поддержана РНФ (грант № 18-19-00124)

УДК 536.244

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ НАНОЖИДКОСТИ С НАНОЧАСТИЦАМИ SiO_2

Бочкарева Е.М., Миськив Н.Б., Назаров А.Д., Терехов В.В, Терехов В.И.

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

e-mail: Prefous-lm@yandex.ru

Изучение процессов испарения жидких капель, состоящих как из многокомпонентных смесей, так и содержащих взвешенные включения твердых частиц, имеет большое значение при проектировании различных энергетических устройств [1,2]. Процессы испарения капель жидкости применяются в камерах сгорания жидкостных реактивных двигателей и двигателей внутреннего сгорания, при сжигании мазута [3, 4]. В химических технологиях, при нанесении красок и покрытий, в производстве новых материалов [5]. В последние годы наблюдается значительный рост интереса к этой теме в аграрной промышленности, в борьбе с пожарами, медицине, биологии.

Так наножидкости демонстрируют новые тепловые явления переноса в сравнении с чистыми жидкостями и суспензиями с макро частицами. К таким явлениям относятся: увеличение теплопроводности при добавлении в жидкость наночастиц; нелинейность теплопроводности наножидкости от температуры, концентрации и размера наночастиц; увеличение критического теплового потока при кипении и т.д. Это говорит о том, что исследование теплофизических свойств нано жидкости представляет большой фундаментальный и практический интерес.

Анализ публикаций последних лет показывает, что работ, посвященных испарению капель наножидкости значительно меньше, в сравнении с исследованиями испарения капель чистых жидкостей и бинарных смесей, состоящих из чистых жидкостей. Из работ по исследованию капель с нано жидкостью больше публикаций по испарению капли с поверхности, чем подвешенной капли.

В настоящей работе изучалась скорость испарения капель воды и наножидкости диаметром d_0 = 1.6–2 мм в потоке воздуха с постоянной температурой T_{0g} = 24 – 25 °C и скоростью u_0 = 0.1 м/с, относительная влажность воздушного потока составляла φ = 15 – 16 %. Начальная температура исследуемых капель T_{0liq} была равна температуре окружающей среды. Эксперименты проводились при внешнем давлении P = 1 атм. Для поддержки капель использовалась державка диаметром 0.1 мм. В качестве рабочей жидкости использовалась наножидкость с массовой концентрацией наночастиц диоксида кремния (SiO_2) 0.1 %.

Для капель, подвешенных в неподвижном или слабоподвижном воздухе (Re < 10), результаты измерений принято обобщать с использованием закона d^2. Опытные данные, обработанные в таком представлении демонстрируются на рис. 1. Отметим линейный характер изменения данных для чистой воды, соответствующий квадратичному закону d^2. Здесь же показано отклонение динамики испарения капель наножидкости от линейного закона. Закон изменения диаметра капли при испарении состоит из двух участков, каждый из которых можно аппроксимировать прямыми линиями с разным углом наклона. Уменьшение диаметра капель наножидкости происходит медленнее в сравнении с каплями воды. На начальном участке закон изменения диаметра капли нано жидкости совпадает с законом испарения капли базовой жидкости. Далее закон изменения испарения капли меняется.

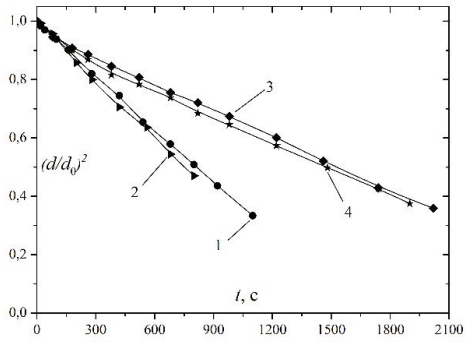


Рис. 1. Изменение относительного диаметра капли $(d/d_0)^2$ со временем t. 1 – вода d_0 = 1.69 мм; 2 – вода d_0 = 1.62 мм; 3 – наножидкость d_0 = 1.95 мм; 4 – наножидкость d_0 = 2.04 мм.

В результате анализа экспериментальных данных можно сказать, что, находясь в одинаковых условиях, капли суспензии с массовой концентрацией 0.1% наночастиц диоксида кремния (SiO_2) в дистиллированную воду испаряются медленнее по сравнению с каплями базовой жидкости. Закон изменения диаметра капель наножидкости при испарении в слабоподвижной среде с обдувом воздушным потоком имеет отклонение от линейного закона d^2. Зависимость $(d/d_0)^2$=f(t) капель наножидкости имеет два участка, которые можно аппроксимировать прямыми с разным углом наклона.

1. Sazhin S.S. Advanced models of fuel droplet heating and evaporation // Progress Energy and Combustion Science. 2006. V. 32. P. 162–214.
2. Lage P.L.C., Rangel R.H., Hackenberg C.M. Multicomponent heat and mass transfer for flow over a droplet // Int. J. Heat Mass Transfer. 1993. V. 34. P. 3573–3581.
3. Castanet G., Perrin L., Caballina O., et al. Evaporation of closely-spaced interacting droplets arranged in a single row // Int. J. Heat Mass Transfer. 2016. V. 93. P. 788–802.
4. Sazhin S.S. Modeling of fuel droplet heating and evaporation: Recent results and unsolved problems // Fuel. 2017. V. 196. P. 69–101.
5. Claire K. Wemp, Van P. Carey. Heat transport for evaporating droplets on superhydrophilic, thin, nanoporous layers // Int. J. Heat Mass Transfer. 2019. V. 132. P. 34–51.

Работа по исследованию процесса испарения капли выполнена при поддержке РФФИ (грант № 20–58–10003). Работа по изготовлению экспериментальной установки выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

УДК 532.529.6

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ И ФОРМЫ ПАРОВОГО ПУЗЫРЯ, ВСПЛЫВАЮЩЕГО В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ ПРИ СУБАТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

Дехтярь Р.А.[1,2], Овчинников В.В.[1]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
[2] Новосибирский государственный университет

e-mail: dekhtyar@itp.nsc.ru

Пузырьки пара, обычно наблюдаемые в кипящей жидкости, всем хорошо знакомы. В природе гейзеры, гидротермальные жерла и извержения вулканов – все эти явления, тесно связанные с пузырьками пара. Паровое течение является одним из основных режимов потока, встречающихся в системах многофазного потока, особенно в системах добычи нефти и газа. Классическая проблема подъема большого газового пузырька в трубе с жидкостью имеет практическое значение для многих отраслей промышленности, энергетики и нефтедобычи [1-3]. Широкое распространение паровых пузырьков является сильной мотивацией для их научного исследования, но, несмотря на кажущееся сходство, их физика может сильно отличаться от физики пузырьков, содержащих в основном газ, растворенный в жидкости. Пузырьки пара являются чрезвычайно лабильными объектами. Они быстро реагируют даже на незначительные изменения давления окружающей среды или температуры жидкости, с которой они вступают в контакт. Газ, растворенный в жидкости, диффундирует в пузырьки пара, вызывая явления, такие как короткие и долгоживущие пузырьки, наблюдаемые в том же эксперименте в идентичных условиях. По всем этим причинам эксперименты с пузырьками пара сложны и менее эффективны, чем эксперименты с пузырьками газа [1]. В наших экспериментах исследовался рост, движение парового пузыря в кольцевом канале, когда высота столба жидкости над нагревателем создаёт давление соизмеримое с давлением насыщения при температуре жидкости.

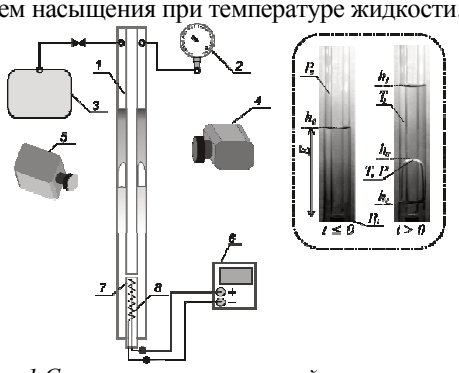


Рис. 1 Схема экспериментальной установки.

На рис. 1 показана схема установки. Жидкость заливалась в калиброванную стеклянную трубку *1* длиной L = 700 мм, внутренним диаметром D = 25 мм. Для образования кольцевого канала по оси трубки устанавливалась стеклянная трубка диаметром 16 мм и цилиндрический электронагреватель *7* диаметром 16 мм. Верхняя часть трубки через вакуумную ловушку соединялась с вакуумным насосом *3*. Давление над жидкостью P измерялось вакуумметром *2*. Для нагрева использовалась нихромовая спираль *8*, с гальванической развязкой от корпуса. Уровень тепловыделения на нагревателе задавался с помощью регулируемого источника постоянного тока *6* мощностью 1000 Вт. Перед проведением экспериментов жидкость дегазировалась.

Для определения объема, площади поверхности, положения h_b, h_c, скорости движения U парового пузыря и уровня жидкости в трубке h_L проводилась видеосъемка рабочего участка цифровой видеокамерой *4* со скоростью до 1000 к/с. Поле температуры жидкости по высоте трубки перед вскипанием определялось по термограммам тепловизора *5*.

Исследование показало, что динамика паровой полости в кольцевом канале, образовавшейся после вскипания на нагревателе в нижней части канала, и затем всплывающей в дегазированной жидкости, во многом соответствует динамике одиночного парового пузырька Тейлора в трубке малого диаметра [4], когда создаваемое давление столбом жидкости над точкой вскипания более чем на 20 % превышает давление в объеме над свободной поверхностью жидкости. Также как и в трубке малого диаметра в кольцевом канале наблюдался пульсационный режим изменения массы и объема паровой полости, связанный с изменением высоты уровня жидкости в трубке. Что являлось следствием того, что при росте парового пузыря уровень жидкости в канале повышался на величину соизмеримую с начальной высотой жидкости. Вследствие этого давление в пузыре достигало величины, при которой создавались условия для конденсации пара. При конденсации происходит разогрев жидкости вблизи пузыря и уменьшение давления в пузыре, что приводит к условиям, когда температура жидкости около пузыря превышает температуру насыщения и как следствие жидкость закипает, и объём пузыря вновь начинает резко увеличиваться. Но в отличии от парового пузыря в [4] при конденсации паровая полость в настоящем исследовании распадается на множество отдельных пузырьков, при вскипании которых формируется новая паровая полость.

Список литературы

1. Prosperetti A. Vapor Bubbles // Annual Review of Fluid Mechanics. 2017. V. 49. No. 1. P. 221–248.
2. Morgad A.O., Miranda J.M., Araujo J.D.P. and Campos J.B.L.M. Review on vertical gas–liquid slug flow // Int. J. Mult. Flow. 2016. V. 85. P. 348–368.
3. Massoud E.Z., Xiao Q., El-Gamal H.A. and Teamah M.A. Numerical study of an individual Taylor bubble rising through stagnant liquids under laminar flow regime // Ocean Engng. 2018. V. 162. P. 117–137.
4. Slesareva E.Y., Dekhtyar R.A. and Ovchinnikov V.V. Motion of a single vapor Taylor bubble in the vertical tube of small diameter // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1359. P. 012128.

Работа выполнена в рамках госзадания ИТ СО РАН

УДК 631.1+548.562

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА САМОКОНСЕРВАЦИИ ГИДРАТОВ CF_4

Жданов Р.К.[1,2], Гец К.В.[1,2], Божко Ю.Ю.[1,2], Субботин О.С.[1,2], Белослудов В.Р.[1,2]

[1] Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск
[2] Новосибирский государственный университет

e-mail: rav@niic.nsc.ru

Газовые гидраты (клатратные гидраты) – это кристаллические нестехиометрические соединения, образованные молекулами воды и подходящими по размеру молекулами гостей, которые при определенных термодинамических условиях (высокое давление и/или низкая температура) занимают полости в кристаллической решетке гидрата, приводя к стабилизации данной структуры. В зависимости от молекулы гостя, температуры и давления образуется одна из трех структур гидратов: кубическая структура I (КС-I), кубическая структура II (КС-II) и гексагональная структура III (ГС-III). Газовые гидраты могут спонтанно образовываться в газотранспортных системах, в системах нефтепереработки и вызывать серьезные технологические и экономические трудности эксплуатации этих систем [1]. Одновременно с этим газовые гидраты могут быть использованы в качестве основы для хранения, транспортировки газов, для улавливания углекислого газа, для разделения газовых смесей, использоваться для дистилляции морской воды и пр. [2].

Было обнаружено, что гидраты определенных газов показывают аномально долгое время существования при условиях, выходящих за область их термодинамической стабильности. Данный эффект получил название «эффект самоконсервации» [3]. Применение на практики этого эффекта может значительно упростить использование гидратов для хранения газов. В настоящее время основные работы по данной тематике имеют общий характер и не заостряют свое внимание на особенностях того или иного газа, т.к. данные особенности способны играть существенную роль, когда речь заходит о конкретном приложении. Кроме этого, на текущий момент наиболее популярное объяснение эффекта самоконсервации предполагает наличие кинетического барьера для диффузии газа через слой льда на поверхности гидрата, который образуется при начальном плавлении самого гидрата. Точное объяснение эффекта и его механизмов до сих пор остаются до конца не ясными.

Тетрафторид углерода (CF_4) в настоящее время широко используется во множестве технологических процессов. В частности при производстве полупроводниковой микроэлектронике. В данной работе было произведено теоретическое исследование эффекта самоконсервации гидратов тетрафторида углерода в системе «лед Ih – гидрат CF_4 – CF_4 (газ)» с использованием комбинации методов молекулярной динамики (пакет LAMMPS) и методов решеточной динамики, при поддержке оригинальной статистическо-термодинамической моделью соединений включения [4], основанной на хорошо известной модели Ван-Дер-Ваальса и Платтью.

Согласно ранее предложенной нами модели самоконсервации гидратов [4] основным фактором, ответственным за наличие данного эффекта, является разница коэффициентов термического расширения гидрата и ледяной корки, которая неизбежно образуется на поверхности гидрата, что в свою очередь создает дополнительное давление, которое возвращает гидрат обратно в зону его термодинамической стабильности. Согласно проведенным расчетам было получено, что гидрат CF_4 обладает большим коэффициентом термического расширения в сравнении не только с гипотетической пустой решеткой гидрата, но и льдом Ih. При этом значения коэффициента линейного термического расширения сопоставимы с гидратом метана, что позволяет говорить о наличии эффекта самоконсервации гидратов тетрафторида углерода. Отдельно стоит отметить, что коэффициент расширения гидрата очень чувствителен к составу гидрата и способен варьироваться в широких пределах в зависимости от внешних условий. Моделирование методами молекулярной динамики показали наличие сплошной сетки водородных связей на границе раздела гидрат – лед, а также была показана кинетическая стабильность данной системы.

Список литературы

1. Sloan E.D., Koh C.A., Clathrate Hydrates of Natural Gases 3rd ed. // CRC Press. Taylor & Francis Group. Boca Raton. 2008.
2. Khokhar A.A., Gudmundsson J.S., Sloan E.D. Gas storage in structure H hydrates // Fluid Phase Equilibria. 1998. V. 150–151 P. 383–392.
3. Stern L.A., Circone S., Kirby S.H., Durham W.B. Anomalous preservation of pure methane hydrate at 1 atm. // J. Phys. Chem. B. 2001. V. 105. P. 1756–1762.
4. Belosludov R.V., Bozhko Y.Y., Zhdanov R.K., Subbotin O.S., Kawazoe Y., Belosludov V.R. Hydrogen hydrates: Equation of state and self-preservation effect // Fluid Phase Equilibria. 2016. V. 413, P. 220–228.

Работа поддержана РНФ (грант № 18-19-00124)

УДК 536.715

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДОПИРОВАННЫХ ГИДРОКСИДОМ КАЛИЯ ГИДРАТОВ МЕТАНА И ПРОПАНА

Жданов Р.К.[1,2], Гец К.В.[1,2], Божко Ю.Ю.[1,2], Субботин О.С.[1,2], Белослудов В.Р.[1,2]

[1] Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск
[2] Новосибирский государственный университет

e-mail: rav@niic.nsc.ru

Классические клатратные гидраты, являясь соединениями включения, содержат не-ионные соединения в полостях своей решётки, образованной посредством водородных связей, и термодинамически более стабильны, чем лёд. В таких гидратах молекулы-гости взаимодействуют с решёткой хозяина (молекулами воды) только посредством сил Ван-дер-Ваальса. В отличие от них, ионные клатратные гидраты (ИКГ) образуют множество клатратных структур со включением гидрофобных катионов в полости и встраиванием гидрофильных анионов относительно небольшого размера в связанный водородными связями каркас или одновременным включением гидрофильных и гидрофобных компонентов многоатомных соединений [1]. Включенные в структуру ИКГ соединения образуют более сильные химические связи с решёткой хозяина.

Структура $KOH \cdot H_2O$ известна давно [2], температура её плавления составляет 400 K [3]. Позже были открыты $KOH \cdot nH_2O$, где n = 2, 4 и 5. Дигидрат (n = 2) плавится при ~306 K, тетрагидрат (n = 4) разлагается при ~239.5 K, а самый насыщенный водой пентагидрат (n = 5) при ~207.5 K разлагается на тетрагидрат и лёд [4]. Добавление KOH в начальный водный раствор приводит к повышению температуры плавления ИКГ [5]. При низких температурах допирование KOH приводит к существенному повышению динамики протонов водного каркаса и устанавливает протонное упорядочение при более низких температурах [6].

Низкая стоимость образования гидратов делает ИКГ перспективным материалом для разделения газовых смесей, а также для отделения парникового углекислого газа для его последующей утилизации в виде гидрата. Также возможно использование ИКГ для хранения газов, в том числе природного.

В данной работе было проведено теоретическое исследование термодинамических свойств гидратов метана структуры КС-I и пропана структуры КС-II, в водные каркасах которых часть молекул воды была заменена молекулами гидроксида калия, с помощью методов сопряженных градиентов и решёточной динамики [7]. Элементарная ячейка моделей, содержащая 46 (КС-I) и 136 (КС-II) молекул воды, часть которых была заменена молекулами KOH.

Положения минимумов потенциальной энергии молекул структур гидратов метана и пропана, содержащих молекулы KOH, (оптимизация) были найдены при помощи метода сопряжённых градиентов, исключающего тепловое движение молекул. В рамках метода решёточной динамики были определены фононные спектры оптимизированных структур и найдены плотности фононных состояний этих гидратов в зависимости от температуры в пределах от 70 K до 280 K. Расчёт фононного спектра позволил исследовать динамическую стабильность структур, а также рассчитать колебательную энергию молекул и свободную энергию Гельмогольца в зависимости от температуры системы. Для моделирования молекул воды были использован модифицированный потенциал SPC/E [7], для моделирования молекул гидроксида калия был использован OPLS-AA.

Использованный подход позволил изучить динамические свойства гидрата гидроксида калия и показать влияние молекул KOH на фононный спектр структуры гидратов метана и пропана для ряда температур. В рамках статистико-термодинамической теории [7] построены кривые свободной энергии для широкого набора температур при различных объёмах элементарной ячейки. На основе расчётных данных, построены линии теплового расширения гидрата в зависимости от давления и проведено сравнение полученных данных с аналогичными для кристаллического льда гексагональной структуры Ih, что позволило сделать вывод о возможности выявления эффекта самоконсервации в гидратах, каркас которых содержит молекулы гидроксида калия.

Список литературы

1. Hydrate inclusion compounds / G.A. Jeffrey, In: Inclusion Compounds; Editors: J.L. Atwood, J.E.D. Davies, D.D. MacNicol. London: Academic Press. 1984. P. 105–134.
2. Cohen-Adad R., Michaud M. Les equilibres liquide-solide du systeme binaire eau-potasse. // C. R. Acad. Sciences Paris 1956. V. 242. P. 2569–2571.
3. Jacobs H., Tacke T., Kockelkom J. Hydroxidmonohydrate des Kaliums und Rubidiums; Verbindungen, deren atomanordnungen die Schreibweise K(H2O)OH bzw. Rb(H2O)OH nahelegen. // ZAAC 1984 V. 516. P. 67–78.
4. Rütter H., Mootz D. Hydrate schwacher und starker Basen. V. Die Kristallstrukturen von KOH·2H2O (Substruktur) und $KOH \cdot 4H_2O$. // ZAAC 1991. V. 601. P. 73–82.
5. Cha J.H., Lee W., Lee H. Thermal stability and ionic conductivity of the ionic clathrate hydrates incorporated with potassium hydroxide. // J. Mater. Chem. 2009. V. 19. P. 6542–6549.
6. Nelson H., Nowaczyk A., Gainaru C., Schildmann S., Geil B., Böhmer, R. Deuteron nuclear magnetic resonance and dielectric study of host and guest dynamics in KOH-doped tetrahydrofuran clathrate hydrate. // Phys. Rev. B. 2010. V. 81. P. 224206-1-10.
7. Belosludov R.V., Subbotin O.S., Mizuseki H., Kawazoe Y. Belosludov V.R. Accurate description of phase diagram of clathrate hydrates at the molecular level. // J. Chem. Phys. 2009. V. 131. P. 244510-1-12.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИНХ РАН в области фундаментальных научных исследований, проект V.44.4.9

УДК 536.46+621.762.5

КИНЕТИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ СИНТЕЗЕ ПОРИСТЫХ КОМПОЗИТОВ ИЗ СМЕСЕЙ ПОРОШКОВ TI + SI И TI+AL+SI В РЕЖИМЕ РЕАКЦИОННОГО СПЕКАНИЯ

Князева А.Г., Коростелева Е.Н.

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

e-mail: anna-knyazeva@mail.ru

Среди наиболее востребованных материалов особый интерес представляют композиты на основе титана, который интересен с точки зрения его взаимодействии с целым рядом технологически важных компонентов: C,Si,B, Al и др. Спекание титана в присутствии других компонентов широко изучалось на протяжении последних десятилетий. Тем не менее, ряд наблюдаемых закономерностей (объемные изменения, выделения неравновесных фаз, спекание в условиях вторичного термического воздействия и др) остается неизученным. В настоящей работе осуществлено теоретическое и экспериментальное исследование синтеза пористых композитов из смесей порошков для систем Ti-Si и Ti-Al-Si в режиме реакционного спекания.

Для спекания приготовлены порошковые компакты разного состава в виде цилиндрических образцов диаметром 10 мм и высотой 10-15 мм. Пористость сырых компактов составляла от 20 до 28 % в зависимости от типа состава. Для прессовок из элементарных порошков с участием алюминия интенсивность нагрева варьировалась на разных этапах спекания. Дана оценка объемным изменениям спеченных образцов с эволюцией их пористости и плотности; изучены состав и структура.

При оценке спекаемости порошковой системы Ti-Si сравнивали поведение прессовок из обычной смеси порошков Ti и Si; Ti и силицида титана Ti_5Si_3 и их порошкового аналога, синтезированного в режиме горения. Спекание простой смеси элементарных порошков титана и кремния приводит к значительному объемному росту прессовок и увеличению остаточной пористости. После спекания практически отсутствует α-Ti, в основном преобладают силициды Ti_5Si_3 и Ti_5Si_4. При замене в порошковой смеси элементарного кремния его соединением Ti_5Si_3 процесс спекания происходит более интенсивно, наблюдается заметное снижение пористости, каких-либо изменений фазового состава не происходит.

При анализе трехкомпонентных составов Ti-Al-Si в эксперименте ориентировались на два типа порошковых композиций, содержащих Ti_3Al и $TiAl_3$; второй фазой предполагался силицид Ti_5Si_3 как наиболее стабильное соединение. Температуры 1000°C. оказалось достаточно, чтобы спровоцировать бурное реакционное спекание с образованием большого количества жидкой фазы. Из этих же исходных составов получали пористые композиты в режиме горения, а затем их дробили и получали композитные порошки, которые затем спекали при температуре 1300°C. В результате спекания порошков $TiAl_3$+Ti_5Si_3 усадка достигала до 27 % от первоначального объема. Доля пор сократилась с 35 до 15.

Разработана термокинетическая модель реакционного спекания, учитывающие конкурирующие физико-химические стадии. Модель включает уравнение баланса тепла, кинетические уравнения для компонентов, участвующих в реакциях, кинетическое уравнения для удаления испаряющегося пластификатора и уравнение для изменения пористости в процессе нагрева, реакционного спекания и остывания. Названные процессы приводят к появлению локальных напряжений и объемным изменениям.

Для системы Ti-Si модель в общем случае учитывает 9 реакций, в результате которых образуются силициды титана, которые возможны в соответствии с равновесной диаграммой состояния: TiSi, $TiSi_2$, Ti_3Si, Ti_5Si_3, Ti_5Si_4. При избытке титана состав матрицы – это просто оставшийся титан. Поэтому упрощенный вариант модели может включать всего одно кинетическое уравнение, соответствующее образованию силицидных частиц.

При добавлении в систему алюминия ситуация усложняется. Титан тратится как на образование частиц, так и на формирование интерметаллидной матрицы. Т.е., кроме, 9 уравнения образования силицидов, учитываются еще и реакции, приводящие к образованию интерметталлидов: TiAl, Ti_3Al, $TiAl_3$. Однако упрощенный вариант модели может быть сведен к двум уравнениям для параллельных реакций – образование частиц и матрицы.

В теории спекания (например, авторы Райченко, Ковальченко, Скороход, Ивенсен, Олевский; R.M.German и др) имеется множество различных кинетических законов для пористости θ, которые содержат параметры, определяемые на основе данных эксперимента. Достаточно формальный подход позволяет записать

$$\theta = 1 - (1 - \theta_0) exp\left(\int_0^t \frac{dw}{dt} dt \right),$$

где функция *w* состоит из трех частей. Связана с изменением температуры, вторая – с изменением состава в результате химических реакций; третья – с давлением в порах испаряющегося пластификатора. Индекс «0» относится к начальному состоянию.

При учете плавления титана как наиболее легкоплавкого компонента теплота плавления учитывается через теплоемкость. Предполагается, что плавление возможно в некотором интервале температур, в котором происходит накопление жидкой фазы. Продукты реакций являются тугоплавкими.

Задача решена численно. Результаты расчетов позволяют становить влияние управляющих факторов (скорости нагрева, температуры и времени спекания, начального состава смеси) на состав синтезируемого композита.

Работа поддержана РНФ (грант № 17-19-01425-П)

УДК 536.242

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ АЗОТА НА ТРУБЧАТЫХ НАГРЕВАТЕЛЯХ СО СТРУКТУРИРОВАННЫМИ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

Кузнецов Д.В.[1], Павленко А.Н.[1], Чернявский А.Н.[1], Радюк А.А.[2]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
[2] Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва

e-mail: Kuznetsov_9308@mail.ru

В работе представлены результаты экспериментального исследования влияния трехмерных капиллярно-пористых покрытий (ТКП) с различными микроструктурными параметрами, полученных методом направленного плазменного напыления, на теплообмен при кипении жидкого азота в условиях стационарного тепловыделения. Суть данного метода, предложенного авторами [1], заключается в том, что в высокотемпературную плазменную струю подаётся порошок распыляемого материала, который нагревается, плавится и в виде двухфазного потока направляется на подложку под углом наклона оси конуса напыляемых частиц к поверхности подложки. Преимуществом данного метода относительно традиционного плазменного напыления является одновременное сочетание высокой пористости покрытий и структурированности поверхности в виде квазиупорядоченных гребней и каналов.

В качестве исходных поверхностей использовались цилиндрические нагреватели из нержавеющей стали внешним диаметром 3 мм и толщиной стенки 0.5 мм, а также медные цилиндрические трубки внешним диаметром 16 мм и толщиной стенки 3 мм. Для напыления был использован порошок бронзы, содержащий 9% алюминия и 2% марганца. Получены основные микроструктурные характеристики покрытий.

В ходе экспериментов были получены кривые кипения и критические тепловые потоки (КТП) для гладких нагревателей и нагревателей со структурированными капиллярно-пористыми покрытиями. Для всех исследованных участков с ТКП-покрытиями на трубках малого диаметра наблюдается существенная интенсификация теплообмена в широком диапазоне тепловых нагрузок. При малых плотностях теплового потока наблюдаются два характерных тренда: максимальная интенсификация теплообмена (более чем в 3.5 раза) – для нагревателей с большой шириной каналов покрытия (больше отрывного диаметра пузыря, который составляет порядка 300 мкм), и более низкая интенсификация (до 2.5 раз) – для образцов с малой шириной каналов. Кроме того, наблюдается тенденция уменьшения степени интенсификации теплообмена, которая стремится к единице по мере приближения плотности теплового потока к значениям кризиса теплоотдачи на гладком нагревателе.

Для образцов с ТКП-покрытиями с шириной каналов меньше 300 мкм на трубках диаметром 16 мм наблюдается интенсификация теплообмена до 3.5 раз в области малых тепловых потоков, которая снижается до 2 раз при тепловых потоках, близких к КТП на нагревателе без покрытия. Стоит отметить, что исключением являлся образец с толщиной остаточного слоя покрытия 700 мкм, для которого интенсификация наблюдалась лишь при тепловых потоках меньше 2 Вт/см^2. Дальнейшее увеличение мощности тепловыделения для данного рабочего участка приводит к весьма существенной деградации коэффициентов теплоотдачи. Такая толщина остаточного слоя, по-видимому, приводит к значительному увеличению гидравлического сопротивления при фильтрации пара из нижних слоев покрытия и фактически лимитирует интенсивность теплопередачи режимом эффективной теплопроводности структуры при условии ее заполнения паровой фазой.

На основе анализа данных высокоскоростной видеосъемки было обнаружено, что центры парообразования при кипении жидкого азота на гладких участках в области малых тепловых потоков не являются стабильными. Так, в частности, наблюдалась периодическая деактивация в течение длительного времени (относительно времени роста и отрыва парового пузыря) отдельных центров. В тоже время на всех ТКП-покрытиях наблюдалась непрерывная парогенераця, что может являться одним из механизмов интенсификации теплообмена. Кроме того, для модифицированных участков с шириной каналов больше отрывного диаметра пузыря на гладком участке характерно формирование крупных паровых конгломератов в каналах между гребнями покрытия до момента отрыва паровой фазы от теплоотдающей поверхности. Формирование крупных паровых образований в каналах покрытия приводит к общему увеличению областей тонких менисков жидкости между паровой и твёрдой фазами и, как следствие, к значительному увеличению доли тепла, передаваемого за счёт интенсивного испарения в макрослое. Как показал анализ данных видеосъемки, плотность центров парообразования не является определяющим механизмом интенсификации теплообмена при кипении жидкого азота на структурированных капиллярно-пористых покрытиях.

Список литературы

1. Kalita, V.I., Komlev, D.I., Komlev, V.S., Radyuk, A.A. The Shear Strength of Three-Dimensional Capillary-Porous Titanium Coatings for Intraosseous Implants // Material Science and Engineering. 2016. V. 60. P. 255–259.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00726 мол_а и программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы III.18.2.3, АААА-А17-117030310025-3

УДК 536.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУИ, ВОЗНИКАЮЩЕЙ ПРИ НАГРЕВЕ ЖИДКОСТИ НЕПРЕРЫВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Кулик А.В.[1,2], Мокрин С. Н.[1,2], Чудновский В.М.[2,3], Минаев С.С.[2]

[1] Дальневосточный федеральный университет, Владивосток
[2] Институт прикладной математики ДВО РАН, Владивосток
[3] Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток

e-mail: kulik_av@dvfu.ru

При кипении, недогретом до температуры насыщения, возникают неравновесные пузырьки пара, рост которых сменяется последующим коллапсом. Известно [1], что если форма пузырьков пара отлична от сферически симметричной, то при коллапсе они генерируют струю нагретой жидкости. При этом скорость струи может достригать нескольких десятков м/с. Данное явление нашло широкое применение в различных областях, в частности, в лазерной хирургии. Однако, в силу скоротечности процесса, механизм формирования струи и факторы, влияющие на ее параметры, изучены недостаточно. В данной работе представлены результаты экспериментального исследования недогретого кипения, вызванного нагревом жидкости непрерывным лазерным излучением, передаваемым в рабочий объем через оптическое волокно, торец которого был предварительно зачернён.

Для исследования был выбран непрерывный полупроводниковый лазер с длиной волны 0,97 мкм и мощностью 7 Вт. Кварцевый волновод диаметром 600 мкм помещался вертикально в кювету размером 100x100x50 мм, наполненную деаэрированной водой при температуре 20 ^{o} C

Высокоскоростная съёмка выполнялась с помощью видеокамеры Photron Fastcam SA-Z со скоростью 240 тыс. кадров/сек и разрешением 128x256 пикс. для подсветки изображения использовался светодиодный прожектор мощностью 100 Вт. Световой поток был направлен непосредственно в объектив камеры. Кювета устанавливалась между прожектором и камерой на координатном столе. Для устранения паразитной засветки от торца волновода на объектив камеры был установлен светофильтр С3С25 с полосой пропускания 280-900 нм.

Благодаря высокой скорости съёмки удалось детально изучить особенности формирования и распространения кумулятивной струи, возникающей в результате схлопывания парового пузыря в процессе вскипания жидкости. На рис. 1 представлена зависимость скорости распространения границы пузыря и фронта струи вдоль оси волновода от времени. Квадратами обозначены экспериментальные значения мгновенной скорости фронта, а линией – аппроксимированная скорость.

В период от 0 до 200 μсек наблюдался рост и последующее уменьшение объёма парового пузыря. С 200 по 240 μсек формировалась кумулятивная струя с образованием и разрушением перетяжки между основным «телом» пузыря и торцом волновода. С 240 по 330 μсек вследствие проникновения струи внутрь пузыря, образовывался тороидальный вращающейся паровой объём, который затем окончательно схлопывался. С 330 μсек наблюдалось распространение образовавшейся струи вдоль оси симметрии волновода.

Как следует из рис. 1, скорость роста пузыря достигала 8 м/с, а максимальная скорость схлопывания не превышала 5 м/с. Скорость струи образовавшейся в результате разрыва перетяжки достигала 10 м/с. Гармоническое затухание скорости вызвано тем, что вихрь, образовавшийся в результате схлопывания пузыря, как бы подталкивает фронт струи вперёд.

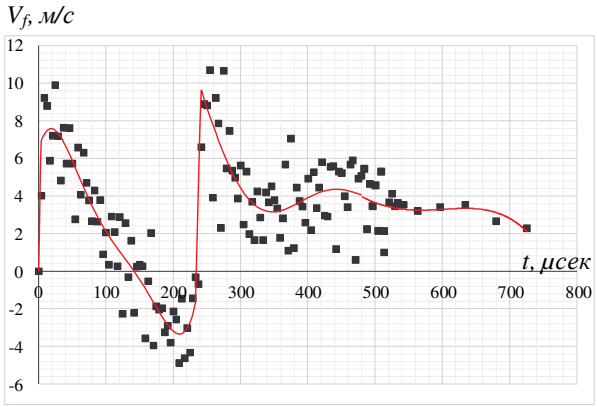


Рис. 1. Зависимость скорости распространения границы пузыря и фронта струи вдоль оси волновода от времени.

В работе также была исследована периодичность возникновения паровых пузырьков на торце волновода. Для этого торец волновода покрывался тонким слоем аморфного углерода. Для анализа был выбран фрагмент видео продолжительностью~ 225 мс, состоящий из~ 55 тыс. кадров. Обработка данного фрагмента показала, что большая часть возникающих пузырьков имеет схожее время существования – 80 μсек. Помимо этих пузырьков случайным образом возникали пузыри меньшего размера, время жизни которых было в среднем в 3 раза меньше. Разбивка исходного фрагмента на четыре одинаковых временных интервала показала равномерное распределение больших пузырей. В результате средний временной интервал между такими пузырями составил 5,62 мс, таким образом, частота возникновения пузырей составила~175 Гц.

Список литературы

1. V.M. Chudnovskii et al., The formation of a cumulative jet during the collapse of a vapor bubble in a subcooled liquid formed as a result of laser heating // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020 V. 150. P. 119286

Работа поддержана Минобрнауки РФ (грант № 075-15-2019-1878)

УДК 532.526.2, 536.24

ТЕМПЕРАТУРА ИНВЕРСИИ ПРИ ИСПАРЕНИИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ЭТАНОЛА И АЦЕТОНА В ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ ВОЗДУХА И ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА РАВНОВЕСНОГО СОСТАВА

Макаров М.С.[1,2], Макарова С.Н.[1]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
[2] Новосибирский государственный технический университет

e-mail: msmakarov@itp.nsc.ru

Описание процесса испарения жидких смесей (растворов) представляет интерес для ряда современных технологий, например, для получения синтетических топлив, в том числе из возобновляемого сырья [1], для получения наночастиц из пересыщенных водных растворов [2], для развития технологий дистилляции и ректификации. Одной из актуальных технологических задач является отвод сверхвысоких тепловых потоков при охлаждении электроники, космического оборудования за счёт малозатратного процесса испарения жидкости из микрослоя, для создания которого используются различные микро- и наномодифицированные поверхности [3]. Поскольку смачиваемость поверхности и масштабы микрослоя жидкости напрямую зависят от состава жидкости, важно понимать механизм испарения и уметь предсказывать интенсивность испарения компонентов раствора в различные парогазовые среды.

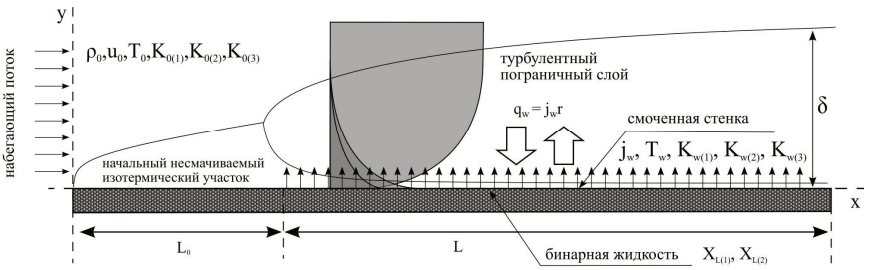


Рис.1. Схема турбулентного пограничного слоя на плоской стенке при адиабатическом испарении двухкомпонентной жидкости.

В данной работе приведены результаты численного моделирования тепломассопереноса в турбулентном пограничном слое на плоской пластине при стационарном адиабатическом испарении бинарных жидкостей этанол/вода, ацетон/вода при атмосферном давлении. Исследовалось стационарное течение трехкомпонентного газа в турбулентном пограничном слое на плоской пластине при адиабатическом испарении пленки двухкомпонентной жидкости. Схема течения и основные параметры задачи представлены на рис. 1. Расчеты проведены при атмосферном давлении, скорости набегающего потока воздуха 10 м/с и температуре от 20 до 500 ºС во всем диапазоне концентраций легкокипящего компонента. Свойства сухого воздуха, как смеси газов, не моделировались. Предварительные оценки показали, что замена воздуха азотом не приводит к значимому изменению результатов расчётов. Состав жидкости по длине пластины принимался постоянным, что соответствует режиму испарения с постоянной подпиткой и интенсивным перемешиванием.

Полученные данные о скорости испарения исследуемых жидкостей в сухой воздух и перегретые пары равновесного состава в зависимости от температуры набегающего потока (см. рис. 2) позволили определить температуру инверсии для смесей с различным содержанием легколетучего компонента. Показано, что в турбулентном пограничном слое зависимость температуры инверсии от температуры кипения жидкости сохраняется. Ранее этот вывод был сделан при исследовании испарения воды в сухой воздух и перегретый пар при различных давлениях. В случае испарения смесей жидкостей температура кипения изменяется за счёт изменения состава.

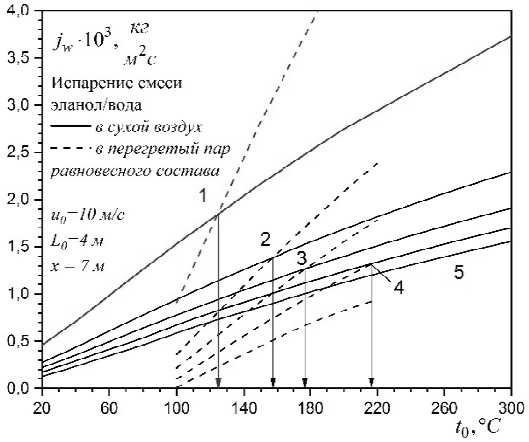


Рис. 2. Интенсивность испарения раствора этанол/вода от температуры набегающего потока воздуха (сплошные линии) или потока перегретой смеси (пунктирные линии), стрелками показана температура инверсии:
1 – $X_{L(C_2H_5OH)}$ =0,97; 2 – 0,2; 3-- 0,12; 4-- 0,04; 5 – 0,004.

Список литературы

1. Марков В.А., Патрахальцев Н.Н. Спиртовые топлива для дизельных двигателей // Транспорт на альтернативном топливе. 2010. № 1. С. 22–26.
2. Fisenko S.P., Khodyko J.A. Low pressure evaporative cooling of micron-sized droplets of solutions and its novel applications // Int. J. Heat Mass Transfer. 2009. V. 52. P. 3842–3849.
3. Wang X., Fadda D., Godinez J.C., Lee J., You S.M. Capillary evaporation of water from aluminum high-temperature conductive microporous coating // Int. J. Heat Mass Transfer. 2020. V. 153. P. 119660.

Разработка численной модели выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН, серии расчётов и обобщение данных выполнены за счёт гранта РФФИ (проект № 20-08-00717а).

УДК 532.526.2, 536.24

МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЁТА СМАЧИВАЕМОСТИ МИКРОСТРУКТУРИРОВАННОЙ ПЛОСКОЙ СТЕНКИ ПРИ ИСПАРЕНИИ В ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ

Макаров М.С.[1,2], Макарова С.Н.[1], Сюзаев А.И.[2]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
[2] Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск

e-mail: msmakarov@itp.nsc.ru

Развитие современных технологий в области силовой и микроэлектроники, разработка высокопроизводительных микросхем, мощных компактных силовых ключей и драйверов, обладающих большим тепловыделением, требует создания новых методов отвода высоких тепловых потоков [1, 2]. Одним из возможных подходов для решения проблемы отвода теплоты от электронных компонентов при сохранении или уменьшении массы и габаритов изделий является использование капиллярно-пористых покрытий (модификаций) поверхности теплообмена, которые способны обеспечивать пассивную подачу охлаждающего жидкого рабочего тела к областям тепловыделения за счёт капиллярного давления. Разработаны различные методы создания микро-, нано-, комбинированных структурированных поверхностей, обладающих требуемыми свойствами. Например, пористая структура [3], вертикальные микростолбики [4], открытые прямоугольные микроканавки [1, 3, 5], спечённые покрытия [6].

Актуальны исследования тепломассообмена на структурированных поверхностях, основанных на массиве открытых микроканавок [1, 3, 5], обладающих высокой проницаемостью для рабочей жидкости, что приводит к малому вязкому трению при высоком тепловом потоке. С помощью таких покрытий возможно охлаждать электронные компоненты с тепловым потоком более 100 Вт/см2. Массивы микроканавок за счёт высокого капиллярного давления обладают способностью перекачивать рабочую жидкость на большие расстояния с беспрецедентными скоростями даже преодолевая силу гравитации, что обусловлено уникальной иерархической впитывающей структурой. Установлено, что скорость распространения рабочей жидкости по вертикально расположенному структурированному образцу стекла может достигать 3,8 см/с [7].

Необходимо подчеркнуть, что задача отвода высоких тепловых потоков от высокотемпературных (теплонагруженных) поверхностей целевых изделий за счёт испарения рабочей жидкости состоит из двух частей: подвод рабочей жидкости к области тепловыделения и отвод пара от поверхности теплообмена во вешнюю среду. Прогресс в разработке эффективных структурированных поверхностей позволяет решить первую часть задачи. Для решения проблемы в целом необходимо обеспечить достаточный конвективный тепло-массообмен на модифицированной поверхности в условиях испарения жидкости и капиллярного смачивания конкретной поверхности.

В данной работе представлена простая физико-математическая модель для расчёта динамики смачивания микроструктурированой плоской стенки при испарении и уносе пара рабочей жидкости в пограничный слой воздуха, обдувающего стенку. На рис. 1 представлена постановка задачи и основные параметры модели. Сформулированы основные законы сохранения в виде дифференциальных уравнений, позволяющих рассчитать скорость и высоту подъёма жидкости в капиллярах, динамику смачивания, глубину и массу жидкости в капиллярах, площадь поверхности испарения.

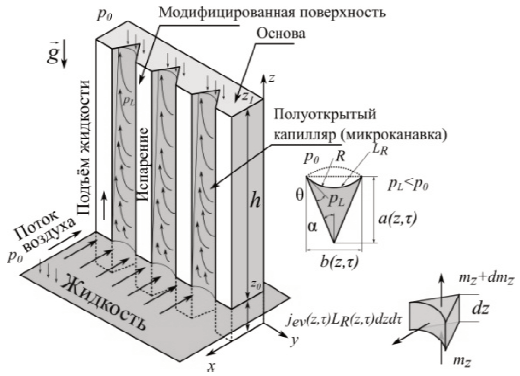


Рис. 1 Постановка задачи смачивания модифицированной плоской стенки при испарении жидкости в поток воздуха: a, b, α - глубина, ширина и полууугол раскрытия треугольной микроканавки; R - радиус мениска; θ - контактный угол смачивания; j_{ev} - интенсивность испарения.

1. Wenbin Zhou, Yijun Luan, Xinlong Dai, Xuegong Hu Study on microbubble dynamic behaviors at vertical micro-nano hybrid surfaces based on open capillary microgrooves heat sink // Int. J. of Thermal Sciences. – 2019. – V. 135. – p. 434-444.
2. Ranran Fang, Hongbo Zhu, Zekai Li, Xiaohui Zhu, Xianhang Zhang, Zhiyu Huang, Ke Li, Wensheng Yan, Yi Huang, Maisotsenko V.S., Vorobyev A.Y. Temperature effect on capillary flow dynamics in 1D array of open nanotextured microchannels produced by femtosecond laser on silicon // Nanomaterials. – 2020. – V. 10. – P. 796. – 14 p.
3. Feng C., Yugeswaran S., Chandra S. Capillary rise of liquids in thermally sprayed porous copper wicks // Exp. Therm. and Fluid Science. – 2018. – V. 98. – p. 206–216.
4. Adera S., Antao D., Raj R., Wang E.N. Design of micropillar wicks for thin-film evaporation // Int. J. Heat. Mass Transf. – 2016. – V. 101. – p. 280–294.
5. Zhou W., Hu X., He Y., Yu Y., Mao L. Study on axial wetting length and evaporating heat transfer in rectangular microgrooves with superhydrophilic nanotextured surfaces for two-phase heat transfer devices // Energy Convers. Manag. – 2019. – V. 200. – P. 112098. – 14 p.
6. Xiaomeng Wang, Dani Fadda, Juan C. Godinez, Jungho Lee, Seung M. You. Capillary evaporation of water from aluminum high-temperature conductive microporous coating // Int. J. Heat. Mass Transf. – 2020. – V. 153. – P. 119660. – 11 p.
7. Vorobyev A.Y., Guo C. Water sprints uphill on glass // J. Appl. Phys. – 2010. – V. 108. – P. 123512. – 4 p.

Разработка модели выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН, тестирование модели, серии расчётов и обобщение данных выполнены за счёт гранта РФФИ (проект № 20-08-00717а)

УДК 532.21

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТАВА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВО-ЛИТИЕВЫХ СПЛАВОВ

Маликов А.Г., Оришич А.М.

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

e-mail: smalik@ngs.ru

Постоянное развитие аэрокосмической промышленности направлено на совершенствования весовой эффективности конечного изделия. Снижение веса и стоимости производства — наиболее сложная технологическая задача в области совместных разработок, как новых материалов, так и перспективных технологий соединения этих материалов, в изделиях авиационной и космической техники. В аэрокосмической промышленности применяются алюминиевые сплавы, которые постоянно совершенствовались в течение прошлого века и в настоящее время составляют около 80% от массы современных самолетов.

В настоящее время алюминиевые сплавы сталкиваются с жесткой конкуренцией со стороны композитных (углеродно-волокнистых, стеклопластиков, органопластиков и др.) материалов и титановых сплавов, что побуждает производителей алюминия разрабатывать более эффективные сплавы для решения задач, стоящих перед развивающимся рынком аэрокосмической техники. Это привело к возобновлению научного и технологического интереса к алюминиево-литиевым сплавам.

Алюминиево-литиевые сплавы обладают малой плотностью за счет легирования литием, повышенным модулем упругости и высокой прочностью по сравнению с обычными алюминиевыми сплавами и являются перспективными материалами для применения в авиа и ракетостроении. С целью замены технологии заклепочного соединения и снижения веса получаемых конструкций, активно разрабатываются технологии сварки алюминиево-литиевых сплавов различными способами: сварка трением с перемешиванием, лазерная сварка, электронно-лучевая сварка. Лазерная сварка обладает рядом преимуществ, таким как высокая скорость, малая зона термического влияния, отсутствие вакуумных камер, гибкость, и возможностью автоматизации процесса. Однако, прочность сварных соединений выполненных лазерной сваркой алюминиево-литиевых сплавов низкая и составляет 0,67-0,8 от прочности основного сплава. Основная причина снижения прочности сварного соединения Al-Li сплавов связанна с изменением структурно-фазового состава, в результате высокоскоростного лазерного нагрева, плавления и последующей кристаллизацией. Это приводит к существенному изменению структурно-фазового состава твердого раствора сварного шва в отличие от твердого раствора исходного сплава.

Целью данной работы является исследование влияние структурно-фазового состава, на механические свойства лазерных сварных соединений, алюминиево-литиевых системы Al-Mg-Li и Al-Cu-Li. с применением электронной сканирующей микроскопии, рентгеновской дифрактометрии и синхротронного излучения.

В работе приведены результаты исследования влияния процесса лазерной сварки и последующей термической обработки (ТО) в виде закалки и искусственного старения на фазовые переходы и прочностные характеристики алюминиево-литиевого сплава 1424 системы Al-5.4Mg-1.61Li (CMg/CLi≈3.3) и В-1469 системы Al-3.4Cu-0.66Mg-1.5Li (CCu/CLi≈2.83).

Основу сплава 1424 является α-твердый раствор легирующих элементов в алюминии (α-Al), кроме этого присутствуют фазы δ′(Al3Li), S1(Al2MgLi), а так же когерентные частицы фазы Al3Sc, Al3Zr и Al3(ScZr). Основу сплава В-1469 является α-твердый раствор легирующих элементов в алюминии (α-Al), кроме этого присутствуют фаза T1(Al2CuLi), так же когерентные частицы фазы Al3Sc, Al3Zr и Al3(ScZr).

Установлено, что на границах и в объеме дендритных зерен сварного шва сплава 1424 формируется множество темных агломератов с характерным размером 0.5-1 мкм фазы S1(Al2MgLi). В твердом растворе сварного шва частицы размером 25-60 нм упрочняющей фазы δ′(Al3Li) отсутствуют, наблюдается незначительное количество частиц размером 100-300 нм фазы S1(Al2MgLi). Прочность сварного шва составила 0,75 от прочности основного сплава. На границах дендритных зерен сварного шва сплава В-1469 формируется множество светлых агломератов с характерным размером 0.5-1 мкм в который присутствуют частицы размером 20-30 нм, упрочняющей фазы T1(Al2CuLi). В твердом растворе сварного шва данные частицы отсутствуют. Прочность сварного шва составила 0,55 от прочности основного сплава.

Оптимальная термическая обработка в виде закалки и искусственного старения изменило микроструктура сварного шва и приблизило к микроструктуре сплава. В твёрдом растворе сварного шва сплава 1424 сформировалась упрочняющая фаза δ′(Al3Li). При этом локализация тройной фазы S1(Al2MgLi) происходило на границе дендритных зерен. Прочность сварного шва составила 0,98 от прочности основного сплава. В твёрдом растворе сварного шва сплава В-1469 сформировалась упрочняющая фаза T1(Al2CuLi). Прочность сварного шва составила 0,91 от прочности основного сплава.

Таким образом, в процессе лазерного воздействия на сплав, упрочняющие фазы исчезают или концентрируются на границе дендрита, в зависимости от системы легирования, прочность сварного шва низкая. После оптимального ТО, в твёрдом растворе сварного шва формируется упрочняющие фазы, что обуславливает существенный рост прочностных характеристик до уровня основного сплава.

Работа поддержана РНФ (грант № 17-79-20139)

УДК 536.6

ТЕПЛОЕМКОСТЬ НИОБАТОВ ВИСМУТА, ЗАМЕЩЕННЫХ ЭРБИЕМ И ЛЮТЕЦИЕМ, В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР 190–370 K

Мацкевич Н.И.[1], Самошкин Д.А.[1,2], Станкус С.В.[2], Семерикова А.Н.[1], Кузнецов В.А.[1], Ткачев Е.Н.[1]

[1] Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск
[2] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

e-mail: nata.matskevich@yandex.ru

В настоящее время во всем мире ведется поиск альтернативных источников энергии [1-3]. Соединения на основе дельта-формы оксида висмута являются перспективными материалами для использования в топливных элементах, кислородных керамических генераторах, селективных мембранах и др. Для того, чтобы сделать дельта-форму оксида висмута устойчивой в широком интервале температур, проводят замещения элементами третьей, пятой, шестой и др. групп. В частности, перспективными для применения являются ниобаты висмута, замещенные редкоземельными элементами. Данные соединения обладают как хорошей ионной проводимостью, так и повышенной термодинамической стабильностью. Детальное физико-химическое исследование замещенных ниобатов висмута будет способствовать большей эффективности использования этих материалов.

В настоящей работе мы измерили теплоемкость в интервале температур 190–370 K для ниобатов висмута, замещенных эрбием и лютецием, следующих составов: $Bi_3Nb_{0.2}Er_{0.8}O_{6.2}$ и $Bi_3Nb_{0.2}Lu_{0.8}O_{6.2}$. Данные составы были выбраны по той причине, что они обладают наиболее высокой ионной проводимостью.

Соединения $Bi_3Nb_{0.2}Er_{0.8}O_{6.2}$, $Bi_3Nb_{0.2}Lu_{0.8}O_{6.2}$ были синтезированы методом твердофазного синтеза из высокочистых оксидов висмута, ниобия, эрбия и лютеция. Характеризация, проведенная рентгенофазовым анализом, показала, что соединения являются индивидуальными фазами, имеют кубическую решетку флюорита (пространственная группа *Fm3m*).

Теплоемкость соединений $Bi_3Nb_{0.2}Er_{0.8}O_{6.2}$, $Bi_3Nb_{0.2}Lu_{0.8}O_{6.2}$ была измерена методом ДСК в интервале температур 190–370 K. Методика проведения экспериментов и калибровка калориметра детально описаны в работе [4].

Измерения осуществлялись на установке DSC 404 F1 (фирма NETZSCH) с использованием платиновых тиглей с корундовыми вкладышами и платиновых крышек со скоростью нагрева 6 K/мин в проточной атмосфере аргона (20 мл/мин). Перед проведением каждого термического цикла рабочий объем установки откачивался до вакуума 1 Па и несколько раз промывался аргоном, чистота которого составляла 99.992 об. %. В качестве калибровочного образца использовался сапфир.

Согласно полученным данным, теплоемкость в интервале температур 190–370 K меняется плавно, отсутствуют какие-то аномалии для обоих соединений, связанные с фазовыми переходами. Теплоемкость ниобата висмута, замещенного эрбием, монотонно изменяется от 183.5 Дж/(K · моль) до 238.9 Дж/(K · моль) при изменении температуры от 190 K до 370 K.

Для ниобата висмута, замещенного лютецием, теплоемкость плавно меняется от 173.3 Дж/(K · моль) до 230.6 Дж/(K · моль) в интервале температур 190–370 K.

Теплоемкости при стандартных условиях (298.15 K) составляют:

$C_p(Bi_3Nb_{0.2}Er_{0.8}O_{6.2}) = 223.0 \pm 3.4$ Дж/(K · моль),

$C_p(Bi_3Nb_{0.2}Lu_{0.8}O_{6.2}) = 212.9 \pm 3.2$ Дж/(K · моль).

Как можно видеть, теплоемкость уменьшается при замене эрбия лютецием. Это коррелирует с уменьшением радиуса редкоземельного элемента *r* от эрбия (r (Er^{3+}) = 0.0890 нм) к лютецию ($r(Lu^{3+})$ = 0.0861 нм). При уменьшении радиуса редкоземельного элемента мольный объем уменьшается. Ранее подобные закономерности были найдены нами для замещенных цератов бария [4].

Отсутствие фазовых переходов в интервале температур 190–370 K для соединений $Bi_3Nb_{0.2}Er_{0.8}O_{6.2}$ и $Bi_3Nb_{0.2}Lu_{0.8}O_{6.2}$ очень важно и делает их перспективными для практического использования в указанном интервале температур.

Список литературы

1. Leszczynska M., Liu X., Wrobel W., Malys M., Dygas J.R., Norberg S.T., Hull S., Krok F., Abrahams I. Oxide ion distribution, vacancy ordering and electrical behavior in the Bi_3NbO_7 – Bi_3YbO_6 pseudo-binary system // J. Mater. Chem. A. 2014. V. 2. P. 18624–18634.
2. Matskevich N.I., Semerikova A.N., Gelfond N.V., Matskevich M.Yu., Tkachev E.N., Anyfrieva O.I., Martynetz V.G. Enthalpy of formation of erbium-doped bismuth niobate // Russ. J. Inorg. Chem. 2020. V. 65. P. 743–746.
3. Matskevich N.I., Wolf Th., Greaves C., Bryzgalova A.N. Preparation, ionic conductivity and thermochemistry of new Bi12.5Lu1.5ReO24.5 phase // J. Alloys Compd. 2014. V. 582. P. 253–256.
4. Matskevich N.I., Wolf Th., Merz M., Stankus S.V., Samoshkin D.A., Vyazovkin I.V., Semerikova A.N., Tkachev E.N. Synthesis and thermodynamic functions of barium cerate co-doped with erbium and indium // Mendeleev Commun. 2019. V. 29. P. 352–354.

Работа поддержана РНФ (грант №19-19-00095)

УДК 536.6

ТЕРМОДИНАМИКА МОНОКРИСТАЛЛОВ ВОЛЬФРАМАТА ЛИТИЯ С НИЗКИМ СОДЕРЖАНИЕМ МОЛИБДЕНА: ТЕПЛОЕМКОСТИ, ЭНТАЛЬПИИ, ЭНЕРГИИ РЕШЕТОК

Мацкевич Н.И.[1], Станкус С.В.[2], Чернов А.А.[2], Шлегель В.Н.[1], Семерикова А.Н.[1], Самошкин Д.А.[1,2], Зайцев В.П.[1]

[1] Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск
[2] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

e-mail: nata.matskevich@yandex.ru

В настоящее время монокристаллы в системе молибдат лития – вольфрамат лития являются одними из перспективных для поиска двойного безнейтринного бета распада и для исследования упругого когерентного рассеяния нейтрино на атомных ядрах [1]. Монокристалл Li_2MoO_4, который, в частности, используется в проекте CUPID, обладает рядом преимуществ. Так, он имеет высокую радио чистоту, в нем содержится предельно низкая концентрация долгоживущих вредных для регистрации изучаемого процесса изотопов. Вольфрамат лития является перспективным материалом для изучения когерентного рассеяния нейтрино. Такие исследования могут способствовать развитию новой физики вне рамок Стандартной модели. Проблема заключается в том, что до настоящего времени не удавалось получить чистый вольфрамат лития методом Чохральского. Это связано с тем, что согласно работе [2] в вольфрамате лития существует фазовый переход. Для получения монокристаллов $Li_2W_{1-x}Mo_xO_4$ использовали замещение молибденом ($x > 0.08$).

В настоящей работе нам впервые удалось получить монокристалл вольфрамата лития с низким замещением молибденом (2.5%) состава $Li_2W_{0.975}Mo_{0.025}O_4$ и исследовать его термодинамические свойства. Для получения монокристаллического $Li_2W_{0.975}Mo_{0.025}O_4$ был использован низкоградиентный метод Чохральского с автоматическим весовым контролем (LTG CZ), разработанный в ИНХ СО РАН [3]. Метод успешно применяется для выращивания сцинтилляционных монокристаллов высокого качества. Монокристалл вольфрамата лития, замещенный 2.5% молибдена, был выращен из высокочистых прекурсоров: карбоната лития (Li_2CO_3, чистота > 0.999), оксида вольфрама (VI) (WO_3, чистота > 0.999), оксида молибдена (VI) (MoO_3, чистота > 0.999). Идентификация, проведенная рентгенофазовым анализом, показала, что кристаллы являются индивидуальными фазами, имеют структуру фенакита и не содержат примесных фаз. Пространственная группа *R3*. Кристалл был прозрачным и не имел каких-либо включений.

Термодинамические свойства полученного монокристалла $Li_2W_{0.975}Mo_{0.025}O_4$ были изучены методом реакционной калориметрии. Детальная информация о калориметре представлена в работе [1]. Для определения стандартной энтальпии образования, энергии стабилизации, энтальпии решетки был построен термохимический цикл. Основными реакциями цикла были реакции растворения карбоната лития, оксида молибдена, вольфрамата калия и монокристалла $Li_2W_{0.975}Mo_{0.025}O_4$ в водном растворе 0.40162 моль кг$^{-1}$ KOH. На основании полученных энтальпий растворения и литературных данных были рассчитаны стандартная энтальпия образования, энергия стабилизации, энтальпия решетки.

Рассчитанная стандартная энтальпия образования для $Li_2W_{0.975}Mo_{0.025}O_4$ составляла: $\Delta_f H^0$ (298.15 K) = −1599.8 ± 3.0 кДж/моль. На основании рассчитанной энергии стабилизации было установлено, что кристалл является термодинамически стабильным. Построенная зависимость энтальпий решеток $Li_2W_{1-x}Mo_xO_4$ от содержания молибдена (x) представляет собой линейную функцию. Это можно объяснить на основе модифицированной формулы Капустинского для энергии решетки [1].

Нами также была измерена теплоемкость монокристалла состава $Li_2W_{0.85}Mo_{0.15}O_4$ методом ДСК в интервале температур 320–965 K. Монокристалл был выращен низкоградиентным методом Чохральского, имел структуру фенакита, пространственная группа *R3*, параметры решетки: a = b = 1.4354 нм; c = 0.9599 нм. Измерения осуществлялись на установке DSC 404 F1 с использованием платиновых тиглей с корундовыми вкладышами и платиновых крышек со скоростью нагрева 6 K/мин в проточной атмосфере аргона (20 мл/мин). Перед проведением каждого термического цикла рабочий объем установки откачивался до вакуума 1 Па и несколько раз промывался аргоном, чистота которого составляла 99.992 об. %. В качестве калибровочного образца использовался сапфир. Было показано, что в исследуемом интервале температур отсутствуют аномалии теплоемкости, связанные с фазовыми переходами. Теплоемкость вещества хорошо описывается кубическим уравнением (Дж/(K моль):

$$C_p = 76.37 + 0.2528\ T - 2.23\times10^{-4}\ T^2 + 8.508\times10^{-8}\ T^3.$$

Отсутствие фазовых переходов для монокристалла $Li_2W_{0.85}Mo_{0.15}O_4$ очень важно для практического использования и открывает перспективы для выращивания чистого вольфрамата лития.

Список литературы

1. Matskevich N.I., Shlegel V.N., Sednev A.L., Semerikova A.N., Zaitsev V.P., Kuznetsov V.A., Novikov A.Yu., Zuev A.Yu. Thermodynamic characteristics of Li_2MoO_4, $Li_2W_{0.85}Mo_{0.15}O_4$ single crystals and stability direction for alkali molybdates // J. Chem. Thermodyn. 2020. V. 143. P. 106059.
2. Pistorius C.W.F.T. Phase behavior of Li2WO4 at high pressures and temperature // J. Solid State Chem. 1975. V. 13. P. 325–329.
3. Borovlev Yu.A., Ivannikova N.V., Shlegel V.N., Vasiliev Ya.V., Gusev V.A. Progress in Growth of Large Sized BGO crystals by the Low-Thermal-Gradient Czochralski Technique // J. Cryst. Growth. 2001. V. 229. P. 305–311.

Работа поддержана РНФ (грант №19-19-00095)

УДК 536.423

ИЗУЧЕНИЕ ГЕТЕРОГЕННОЙ НУКЛЕАЦИИ В ПЕРЕГРЕТОМ Н-ПЕНТАНЕ ПРИ РАЗНЫХ СКОРОСТЯХ ПОНИЖЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

Паршакова М.А., Липнягов Е.В.

Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург

e-mail: parmari@yandex.ru

Нарушение герметичности реакторов, сосудов высокого давления, трубопроводов, содержащих нагретую жидкость, приводит к быстрому снижению давления жидкости ниже давления насыщенных паров. В итоге жидкость может оказаться перегретой (метастабильной) и вскипеть. При глубоких заходах в область метастабильных состояний процесс фазового распада протекает взрывообразно, что часто приводит к аварийной ситуации [1].

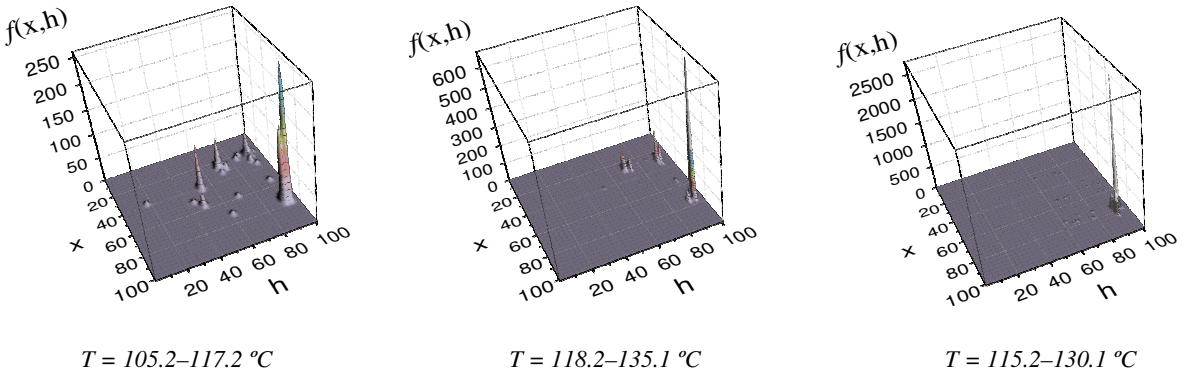


Рис. 1. Плотность распределения «готовых» центров вскипания перегретого н-пентана по площади изображения трубки при разных температурах (T) и скоростях понижения давления p ~ exp(-k·t): (a) k = 0.64; (b) k = 0.20, (c) k = 0.13, где p – давление, t – время в секундах; x, h – ширина и высота в процентах от размеров видимой области, соответственно.

Методами непрерывного понижения давления (в диапазоне температур 105.2–135.1°C) и измерения времен жизни (60.3–125.1°C) исследована кинетика вскипания перегретого н-пентана. В первом случае измерялись температура и давление, при которых жидкость вскипает, во втором – температура и время жизни перегретой жидкости при установившемся атмосферном давлении. Н-пентан находился в стеклянной трубке, имеющей два видимых дефекта на поверхности. Внутренний диаметр трубки – 5.6 мм, объем перегреваемой области $V = 2.8 \cdot 10^{-6}$ м^3. Одновременно с частотой 2050 кадров в секунду велась скоростная видеосъемка процесса вскипания.

На рис. 1 представлена ядерная оценка плотности распределения «готовых» центров вскипания по площади изображения стеклянной трубки [2] при разных скоростях понижения давления (от 2.0 МПа). Из рисунка следует, что подавляющее число событий (вскипаний в процессе сброса давления) происходит на дефектах внутренней поверхности капилляра. Общее количество активных центров ограничено. Одни центры воспроизводятся, другие могут появляться и исчезать. Граница достижимого перегрева определяется наиболее активным центром (дефектом). С увеличением скорости понижения давления число вероятных центров кипения увеличивается, а граница сдвигается в сторону более низких давлений.

На рис. 2 представлена зависимость среднего времени жизни перегретого н-пентана от температуры при атмосферном давлении. Она имеет классический вид: 2–3 ниспадающих участка и 1–2 «плато». Уровни «плато» (порядка 10^3 и 10 с) характерны для других опытов по перегреву н-пентана в стеклянных капиллярах [2]. Их принято объяснять воздействием фонового излучения. Сдвиг кривой на 10°C в сторону высоких температур (ср. точки 1 и 2) при замедлении сброса давления обратим (см. точки 3) и связан с деактивацией центров. «Несдвинутые» точки *1**, *2** в серии опытов 2 получены первыми.

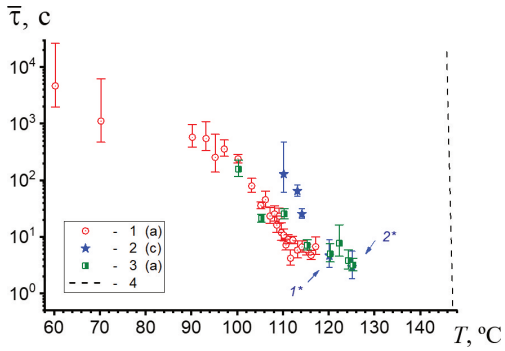


Рис. 2. Зависимость среднего времени жизни перегретого н-пентана от температуры при давлении 0.10 МПа и разной скорости его установления (см. рис. 1): 1–3 эксперимент; 4 расчет по теории гомогенной нуклеации.

Список литературы

1. В.П. Скрипов, Е.Н. Синицын, П.А. Павлов и др. Теплофизические свойства жидкостей в метастабильном состоянии. М.: Атомиздат. 1980. 208 с.
2. E.V. Lipnyagov, M.A. Parshakova, and S.A. Perminov. The study of boiling-up onset of highly superheated n-pentane in a glass capillary at different pressures. I. Visualization by high-speed video and nucleation sites. // Int. J. Heat and Mass Trans. 2017. V. 104. P. 1353–1361.

Работа поддержана РФФИ (грант № 20-08-00270)

УДК 621.9

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В КАПЛЕ ЖИДКОСТИ НА САПФИРОВОЙ ПЛАСТИНЕ

Пономаренко Т.Г.[1,2,3], Чеверда В.В.[1,2]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
[2] Новосибирский государственный университет
[3]Новосибирский государственный технический университет

e-mail: t.evans2010@yandex.kz, slava.cheverda@gmail.com

Испарению капель жидкости посвящено большое количество исследований, однако это явление всё еще представляет значительный интерес. Испарение капли, сидящей на горизонтальной поверхности, рассматривается как комплексный процесс, на который влияют многие факторы: состав жидкости, теплофизические свойства, шероховатость и смачиваемость подложки, условия окружающей среды и т. д. Более глубокое понимание процесса испарения капель может расширить возможности в таких областях промышленности, как охлаждение электроники [1], технология струйной печати, нанесение покрытий, распылительная сушка и т. д.

Многие работы описывают режимы испарения сидячей капли [2]. Есть исследования, проведённые в условиях с разным уровнем гравитации [3]. Другие фокусируются на теплообмене в области трехфазной контактной линии смачивания газ-жидкость-твёрдое тело, большинство из которых показывают, что испарение более интенсивно вблизи контактной линии капли. Результаты исследования теплообмена в капле, помещенной на тонкую нагретую фольгу из константана, показали, что максимальная плотность теплового потока возникает именно в регионе контактной линии капли [4]. Из-за особенностей применения капельного течения на практике предметом многих исследовательских работах является взаимодействие между каплями, теплообмен при их слиянии, процесс испарения капли, окруженной другими каплями и т.д.

Настоящее исследование посвящено изучению теплообмена при испарении капли жидкости на нагретой сапфировой подложке. Целью работы является определение плотности теплового потока в области трехфазной контактной линии с использованием инфракрасной термографии и численных расчётов.

Для проведения экспериментов по исследованию теплообмена в капле жидкости был разработан экспериментальный стенд (см. рис.1). Рабочий участок представляет из себя сапфировую пластину размером 40,07 × 40,37 × 6,4 мм^3. Для нагрева сапфировой подложки и поддержания постоянной температуры по её периметру используется водяной алюминиевый теплообменник. Температура регулируется термостатом LOIP в диапазоне от 20 до 90°C.

Сапфир прозрачен в рабочем оптическом диапазоне используемой инфракрасной камеры Titanium 570M (3,7 – 4,8 мкм). Исходя из этого, используя ИК-сканер, можно измерить распределение температуры на поверхности сапфирового стекла. В связи с тем, что из-за относительно малого поперечного размера региона контактной линии произвести прямых измерений плотности теплового потока в этой области пока не представляется возможным, под рабочим участком установлено позолоченное зеркало. Инфракрасное излучение от нижней поверхности сапфировой подложки, отраженное от зеркала, фиксируется инфракрасной камерой. Поверхность сапфировой пластины, на которую позиционируется капля, покрыта чёрной графитовой краской с коэффициентом излучения, близким к 1. В качестве рабочей жидкости используется сверхочищенная вода, полученная с помощью системы Milli-Q. Капля воды заданного объёма помещается на сапфировую подложку с помощью программируемого шприца через шприцевой насос Cole-Parmer EW-74905-54. Высокоскоростная камера регистрирует процесс падения и испарения капли для изучения гидродинамики и изменения контактного угла капли.

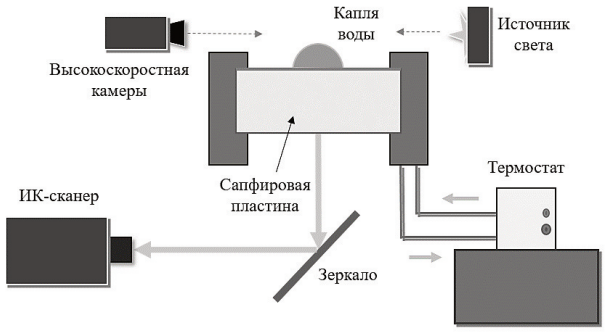


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Данные, полученные с помощью ИК-камеры, используются для расчёта плотности теплового потока на поверхности сапфировой подложки с помощью решения уравнения теплопроводности для сапфировой пластины. Определение плотности теплового потока в области контактной линии смачивания является важной задачей для дальнейшей разработки высокоэффективной системы охлаждения.

Список литературы

1. Bar-Cohen, A., Arik M., Ohadi M. Direct Liquid Cooling of High Flux Micro and Nano Electronic Components // Proc. IEEE. 2006. V. 94, No. 8. P. 1549–1570.
2. Ait Saada, M., et al., Evaporation of a Sessile Drop with Pinned or Receding Contact Line on a Substrate with Different Thermophysical Properties // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2013. V. 58, No. 1-2. P. 197–208.
3. Carle F., Sobac B., and Brutin D. Hydrothermal waves on ethanol droplets evaporating under terrestrial and reduced gravity levels // Journal of Fluid Mechanics. 2012. V. 712. P. 614–623.
4. Cheverda V. V., Karchevsky A. L., Marchuk I. V., Kabov O. A. Heat flux density in the region of droplet contact line on a horizontal surface of a thin heated foil // Thermophysics and Aeromechanics. 2017. V. 24. P. 803–806.

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 18-19-00538

УДК 536.24

ТЕПЛОПЕРЕНОС В СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ФЛЮИДАХ: СОГЛАСОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИМПУЛЬСНЫХ И СТАЦИОНАРНЫХ ОПЫТОВ

Рютин С.Б., Скрипов П.В

Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург

e-mail: ryutin.sergey@gmail.com

В течении нескольких прошедших лет было проведено систематическое исследование нестационарного теплообмена в индивидуальных жидких средах в широкой области сверхкритических параметров (температура T_c, давление p_c). Полученные при этом результаты с первого взгляда выглядят парадоксально в отношении результатов, полученных в стационарных условиях. Известно, что в ближней сверхкритической области параметров при стационарном теплообмене, как вынужденно конвективном, так и при свободной конвекции, наблюдаются пики теплоотдачи. Эти пики выражены тем сильнее, чем ближе параметры к критическим и меньше плотность теплового потока в опыте.

Результаты нестационарных опытов показывают, по существу, обратную картину, а именно, в тех областях сверхкритических параметров, где наблюдается пик теплоотдачи в стационарных опытах, наблюдается пороговое снижение интенсивности теплопереноса. Обнаруженный эффект выражен тем сильнее, чем ближе значение давления к p_c и, затухая, простирается до ~ 3 p_c для всех жидкостей, в отношении которых проведены опыты. Данный результат позволяет говорить об универсальности поведения жидких диэлектриков в условиях нестационарных опытов.

Полученный результат ставит много вопросов, первым из которых является анализ примененной методики. Итак, предметом изучения являлся теплообмен тонкого проволочного зонда (платиновая проволока диаметром 20 μм) с исследуемой средой. Время тепловой релаксации зонда составляет величину ~ 1 μс, что позволяет считать зонд практически безынерционным при временах нагрева в единицы-десятки миллисекунд и осуществлять режимы нагрева, неосуществимые для массивных нагревателей. Малая площадь зонда при рабочей длине 1 см позволяет легко получать сравнительно большие плотности теплового потока через его поверхность (единицы-десятки МВт/м^2) при небольших значениях электрической мощности, рассеиваемой на зонде.

Опыт проводится следующим образом: зонд погружен в жидкость, предварительно сжатую до заданного значения давления, и при импульсном нагреве зонда пристеночный слой жидкости переводился по изобаре из стабильного в сверхкритическое состояние, проходя в процессе нагрева область критической температуры. Малая толщина прогретого слоя (единицы μм) позволяет делать обоснованные предположения о поведении пограничного слоя сверхкритического флюида при больших тепловых нагрузках, поскольку в наших опытах оказываются практически выключенными два важных фактора, затрудняющих интерпретацию получаемых результатов. Речь идет о конвекции и гравитации. Опыты проведены в режиме постоянной мощности нагрева зонда, в том числе с возможностью ступенчатого изменения значения мощности непосредственно в ходе импульса. Такой режим позволил в широких пределах изменять время прохода интервала температуры, в котором при стационарных опытах наблюдался пик теплоотдачи.

Во всех случаях результат, вплоть до начала развития конвекции, оставался тем же: пороговое снижение интенсивности теплопереноса, выраженное тем сильнее, чем ближе значение давления к p_c. Полученный результат не мог быть предсказан, исходя из существующих представлений о сверхкритических флюидах.

Окончательного объяснения физической картины наблюдаемого эффекта пока не найдено. В качестве рабочей гипотезы можно предположить два механизма [1]. Первый связан с распадом среды в ближней сверхкритической области параметров на области повышенной и пониженной плотности, сопровождающимся частичным осушением поверхности нагревателя. Второй механизм связан с возможным формированием адиабатического фронта, быстро удаляющегося от поверхности нагревателя и оставляющего за собой горячую среду, что и затрудняет теплоперенос. Образованию адиабатического фронта в ближней сверхкритической области параметров способствуют аномально низкие значения скорости звука, коэффициента диффузии и аномально высокие значения объемной сжимаемости. Самым сложным является вопрос, почему не обнаруживается пик изобарной теплоемкости и связанный с ним пик тепловой активности, никаких следов которого в эксперимент не наблюдается. Возможное объяснение содержится в работе [2], основная идея которой сформулирована следующим образом: «Равновесное распределение флуктуаций всех масштабов вблизи критической точки устанавливается медленно. При быстром достижении околокритического состояния возможно достижение состояния с малой амплитудой флуктуаций с несингулярными термодинамическими функциями».

Список литературы

1. Rutin S.B., Igolnikov A.A., Skripov P.V. High-Power Heat Release in Supercritical Water: Insight into the Heat Transfer Deterioration Problem // Journal of Engineering Thermophysics. 2020. V. 29. No. 1. 3. 67–74.
2. Я.Б. Зельдович. Восстановление ван-дер-ваальсовой критической точки в быстрых процессах / ЖЭТФ 1981. 80 (5). С. 2111–2112.

Работа поддержана РНФ (грант № 19-19-00115)

УДК 535.21

ФОРМИРОВАНИЕ СУПЕРГИДРОФИЛЬНОЙ МИКРОСТРУКТУРЫ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ КРЕМНИЯ ИМПУЛЬСАМИ ЛАЗЕРА НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

Старинский С.В.[1,2], Родионов А.А.[1,2], Шухов Ю.Г.[1], Сафонов А.И.[1,2], Булгаков А.В.[1,3]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
[2] Новосибирский государственный университет
[3] HiLASE Centre, Institute of Physic, Czech Academy of Science

e-mail: starikhbz@mail.ru

Создание поверхностей с экстремальными свойствами смачивания (супергидрофильность и супергидрофобность) является одним из быстро развивающихся направлений в материаловедении [1]. Это обусловлено широким кругом практического использования таких поверхностей для изготовления антизапотевающих, антикоррозийных, самоочищающихся материалов, сепарационных фильтров, биосенсеров и биочипов. Особое внимание уделяется вопросу получения экстремальных свойств смачивания поверхности кремния, являющегося наиболее распространенным материалом в электроники. Развитие вычислительных мощностей параллельно с миниатюризацией компьютерных устройств столкнулось с проблемой отвода огромных тепловых потоков [2]. Наиболее часто отвод тепла осуществляется с применением жидкостного охлаждения. Формирование поверхности с экстремальными свойствами смачивания, как показали недавние исследования, позволяет существенно интенсифицировать теплообмен [3]. В этом ключе перспективным способом изменения свойств смачивания кремния является лазерная обработка поверхности [4]. Недавно нами было показано, что супергидрофильность кремния может быть получена с помощью достаточно дешевой лазерной системы, генерирующей импульсы наносекундной длительности [5,6]. В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования эволюции состава и морфологии поверхности монокристаллического кремния при его облучении лазерными импульсами видимого и ИК диапазонов. Показано, что с помощью ИК-импульсов в узком диапазоне плотностей энергии лазера 3–6 Дж/см^2 могут быть созданы два типа поверхностных структур микрометрового размера. Первый тип представляет собой трещины скола, которые наблюдаются при относительно небольшом числе импульсов (ранняя стадия обработки) и образуют прямоугольную сетку. Такая сетка из трещин может быть создана в различном фоновом окружении (воздух, инертный газ, вакуум). Микроструктуры второго типа представляют собой микрохолмы размером 5–10 мкм, которые образуются в местах пересечения трещин при дальнейшем облучении материала в кислородсодержащей атмосфере. Предложено два возможных механизма формирования наблюдаемых структур. Первый предполагает развитие гидродинамической неустойчивости в месте контакта расплавленного кремния и его оксида. Второй предполагает особое поведение расплава кремния из-за неравномерности поглощения падающего излучения. Показано, что именно такие микрохолмы придают поверхности кремния свойство супергидрофильности (Рис.1), сохраняющееся в течение длительного времени. В работе продемонстрирована возможная функционализация полученных поверхностей фторполимерным покрытием, что позволяет плавно изменять свойства смачивания поверхности от супергидрофильности до супергидрофобности.

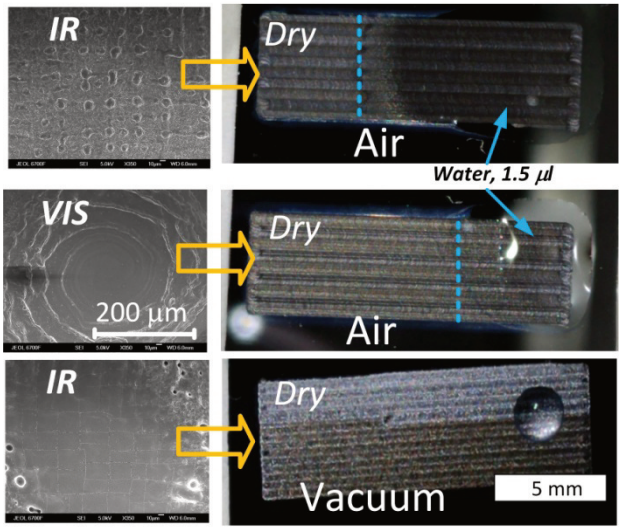


Рис.1. Морфология и смачиваемость поверхности кремния после облучения 50 импульсами наносекундного лазера с плотностью энергии 3.3 Дж/см^2.

Список литературы

1. Drelich J., Marmur A. Physics and applications of superhydrophobic and superhydrophilic surfaces and coatings // Surf. Innov. 2014. V. 2. No. 4. P. 211–227.
2. Sohel Murshed S.M., Nieto de Castro C.A. A critical review of traditional and emerging techniques and fluids for electronics cooling // Renew. Sustain. Energy Rev. 2017. V. 78. May. P. 821–833.
3. Tsang S. et al. On the evaporative spray cooling with a self-rewetting fluid: Chasing the heat // Appl. Therm. Eng. 2018. V. 132. P. 196–208.
4. Vorobyev A.Y., Guo C. Laser turns silicon superwicking // Opt. Express. 2010. V. 18. No. 7. P. 6455–6460.
5. Starinskiy S. V et al. Formation of periodic superhydrophilic microstructures by infrared nanosecond laser processing of single-crystal silicon // Appl. Surf. Sci. 2020. V. 512. P. 145753.
6. Starinskiy S. V. et al. Transition from superhydrophilic to superhydrophobic of silicon wafer by a combination of laser treatment and fluoropolymer deposition // J. Phys. D. 2018. V. 51. P. 255307.

Работа выполнена при финансовой поддержке фондов РНФ (проект №18-79-10119) и РФФИ (проект №19-48-543034), а также в рамках государственного задания ИТ СО РАН (контракт №АААА-А17-117022850025-1)

УДК 536.423

ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА НА ТЕМПЕРАТУРУ ИСПАРЯЮЩИХСЯ ВОДНО-СПИРТОВЫХ КАПЕЛЬ

Стерлягов А.Н., Низовцев М.И, Бородулин В.Ю., Летушко В.Н.

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

e-mail: Sterlyagov@itp.nsc.ru

При проведении экспериментальных исследований испарения капель бинарных растворов рассматривают, как правило, только изменение их геометрических параметров [1–3]. При этом в ряде работ отмечено значительное влияние тепловых эффектов на процессы испарения бинарных капель [4–6]. Таким образом, становится актуальной задача исследования изменения температуры бинарных капель, испаряющихся при различных условиях.

В данной работе выполнены экспериментальные исследования температуры испаряющихся капель водно-спиртового раствора, подвешенных на тонкой нити из малотеплопроводного материала. Такая постановка эксперимента позволила минимизировать влияние нити и получить хорошее приближение к условиям испарения свободных капель. В экспериментах исследовалось испарение капель с различной относительной объемной концентрацией этанола c_v. В результате были определены минимальные значения температуры капель при различной относительной влажности воздуха (рис. 1а).

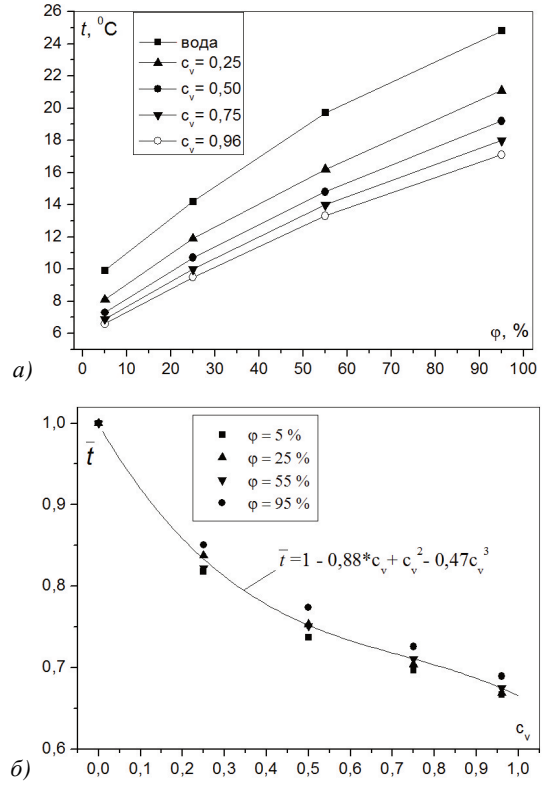


Рис. 1 Минимальная температура испаряющихся водно-спиртовых капель с разной концентрацией этанола при различной относительной влажности воздуха: а) абсолютная t, ℃; б) безразмерная $\bar{t}$.

Данные, представленные на рис. 1а, показывают, что с увеличением относительной влажности воздуха минимальные значения температуры капель возрастают для всех рассмотренных концентраций водно-спиртового раствора. Следует отметить, что при одинаковой относительной влажности воздуха, чем больше была концентрация этанола, тем ниже опускалась минимальная температура капли в процессе испарения. Такое влияние концентрации этанола было отмечено ранее в [7]. Однако результаты этой работы получены только при одной относительной влажности воздуха. Приведенные на рис.1а данные показывают, что подобная закономерность уменьшения минимальной температуры испаряющейся капли с увеличением концентрации этанола характерна для различных относительных влажностей воздуха.

На рис. 1б представлена зависимость безразмерной минимальной температуры испаряющихся водно-спиртовых капель от относительной объемной концентрации этанола, $\bar{t} = t / t_в$, где $t_в$ – минимальная температура капли воды такого же размера, как и водно-спиртовой капли при соответствующей относительной влажности воздуха. В данной обработке полученные экспериментальные данные хорошо обобщаются зависимостью $\bar{t} = 1 - 0{,}88c_v + c_v^2 - 0{,}47c_v^3$. Полученная зависимость может быть использована для определения минимальной температуры испаряющихся водно-спиртовых капель с разной концентрацией этанола при различной относительной влажности воздуха.

В работе получены новые данные по влиянию относительной влажности воздуха на изменение температуры испаряющихся водно-спиртовых капель с различной концентрацией этанола.

Список литературы

1. Саверченко В.И., Фисенко С.П., Ходыко Ю.А. Кинетика испарения бинарной пиколитровой капли на подложке при пониженном давлении// Коллоидный журнал. 2015. Т. 77. №. 1. С. 79–79.
2. Sefiane K., Tadrist L., Douglas M. Experimental study of evaporating water–ethanol mixture sessile drop: influence of concentration // Int. J. Heat Mass Transfer. 2003. V. 46. P. 4527–4534.
3. Liu C., Bonaccurso E., Butt H.J. Evaporation of sessile water/ethanol drops in a controlled environment // Physical Chemistry Chemical Physics. 2008. Т. 10. № 47. С. 7150–7157.
4. Терехов В.И., Терехов В.В., Шишкин Н.Е., Би К.Ч Экспериментальное и численное исследования нестационарного испарения капель жидкости // ИФЖ. 2010. Т. 83. № 5. С. 829–836.
5. Кучма А.Е. и др. Динамика испарения бинарной сидячей капли: теория и сравнение с экспериментом для капли раствора серной кислоты // Коллоидный журнал. 2017. Т. 79. № 6. С. 747–755.
6. Кучма А.Е. и др. Динамика полного испарения сидячей микрокапли раствора 1-пропанол–вода при различной влажности окружающей среды // Коллоидный журнал. 2018. Т. 80. №. 6. С. 679–686.
7. Бородулин В.Ю. и др. Экспериментальное исследование испарения капель водно-спиртовых растворов // Коллоидный журнал. 2019. Т. 81. № 3. С. 289–295.

УДК 519.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ДОБЫВАЮЩИХ СКВАЖИН НА СЕВЕРНЫХ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

Филимонов М.Ю.[1,2], Ваганова Н.А.[1,2]

[1] Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург
[2] Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского УрО РАН, Екатеринбург

e-mail: fmy@imm.uran.ru

Вечная мерзлота, или многолетнемерзлые породы (ММП), занимают 35 млн. км², что составляет около 25% площади всей суши земного шара. В России более 60% ее территории заняты вечной мерзлоты. На таяние вечной мерзлоты оказывают влияние климатические [1] и техногенные факторы [2, 3]. Деятельность человека, связанная с эксплуатацией северных нефтегазовых месторождений, способствует деградации ММП, поскольку работающие различные технические устройства влияют на динамику изменения границ ММП [4–7]. Растепление ММП из-за различных техногенных воздействий будет сопровождаться просадками земной поверхности вокруг инженерных объектов и развитием опасных мерзлотных геологических процессов, называемых термокарстом, который может приводить к крупным техногенным авариям. В настоящее время наблюдается также сокращение инвестиционных программ в освоение новых северных нефтегазовых месторождений. В связи с этим, актуальным является снижение затрат на проектирование и оптимальную эксплуатацию новых и функционирующих нефтегазовых месторождений. Например, сокращение площади кустовых площадок позволяет существенно сократить затраты уже на этапе проектирования. По строительным нормам добывающие скважины нельзя бурить на расстоянии друг от друга ближе, чем два радиуса растепления (расстояния от скважины до нулевой изотермы за 30 лет эксплуатации скважины). Значит, сокращение радиуса растепления приведет к экономии дефицитного материала, используемого для обустройства кустовых площадок, а значит и к уменьшению себестоимости добываемой нефти, что при условии возможного снижения цен на нефть может быть определяющим фактором. При эксплуатации действующих северных месторождений имеются различные варианты проведения плановых технологических операций, связанных, например, с остановкой скважин, использованием факельных систем [8, 9] для утилизации попутного газа и т.п. Актуальным является формирование стратегии плановых мероприятий (например, время начала операций, продолжительность, регламент обслуживания скважин) с целью уменьшения значения радиуса растепления.

В соответствии с работами [1–3] моделирование процессов распространения тепла в мерзлом грунте сводится к решению в заданной области трехмерного уравнения контактной (диффузионной) теплопроводности с неоднородными коэффициентами, включающее локализованную теплоемкость фазового перехода – подход, позволяющий решать задачу типа Стефана, без явного выделения границы фазового перехода.

В качестве нелинейного граничного условия на поверхности грунта используется уравнение баланса потоков, приносящих и уносящих энергию, с учетом основных климатических факторов. Выбор параметров из граничного условия и привязка численного алгоритма к географическим координатам конкретного месторождения рассмотрено в работе [10].

Разработанные математические модели и численные методики были апробированы на 13 северных нефтегазовых месторождениях и показали хорошее совпадение с экспериментальными данными. Применение разработанного комплекса программ для моделирования тепловых полей в ММП позволило выбрать наиболее оптимальные варианты эксплуатации добывающих скважин для сокращения радиуса растепления без использования дополнительных мер теплоизоляции скважин.

Список литературы

1. Vaganova N., Filimonov M. Simulation of freezing and thawing of soil in Arctic regions // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2017. V. 72. P. 012005. Doi:10.1088/1755-1315/72/1/012006
2. Vaganova N. A., Filimonov M.Y. Computer Simulation of Nonstationary Thermal Fields in Design and Operation of Northern Oil and Gas Fields // AIP Conference Proceedings. 2015. V. 1690. P. 020016. Doi:10.1063/1.4936694
3. Filimonov M.Yu., Vaganova N.A. Simulation of Technogenic and Climatic Influences in Permafrost for Northern Oil Fields Exploitation // Lecture Notes in Computer Science. 2015. V. 9045. P. 185–192.
4. Filimonov M.Yu., Vaganova N.A. Simulation of permafrost changes due to technogenic influences of different engendering constructions used in northern oil and gas fields // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 754. P. 112004.
5. Ваганова Н.А., Филимонов М.Ю. Прогнозирование изменений в вечной мерзлоте и оптимизация эксплуатации инженерных систем // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Математика, механика, информатика. 2013. Т. 13. № 4. С. 37–42.
6. Kiselyov F., Sergeyev F. Prediction of construction bases frozen soil temperature development under intense heating // Journal of Physics: Conference Series. 2020. V. 1425. P. 012208.
7. Filimonov M.Yu., Vaganova N.A. Flare Systems Exploitation and Impact on Permafrost // Journal of Physics: Conference Series. 2017. V. 899. P. 092004. Doi: 10.1088/1742-6596/899/9/092004.
8. Filimonov M.Yu., Vaganova N.A. Simulation of Influence of Special Regimes of Horizontal Flare Systems on Permafrost // Lecture Notes in Computer Science. 2019. V. 11386. P. 233–240. Doi:10.1007/978-3-030-11539-5_25.
9. M. Filimonov, N. Vaganova. Short and Long Scale Regimes of Horizontal Flare System Exploitation in Permafrost // CEUR Workshop Proceedings. 2016. V. 1662. P. 253–256.
10. Vaganova N.A., Filimonov M.Yu. On boundary conditions setting for numerical simulation of thermal fields propagation in permafrost soils // CEUR Workshop Proceedings. 2018. V. 2109. P. 18–24.

Работа поддержана проектом РФФИ № 19-07-0043

УДК 536.423.1

К ТЕОРИИ РОСТА ПАРОВОГО ПУЗЫРЬКА В ОДНОРОДНО ПЕРЕГРЕТОЙ ЖИДКОСТИ

Чернов А.А.[1,2], Пильник А.А.[1,2], Владыко И.В.[1,2]

[1] Новосибирский государственный университет
[2] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

e-mail: chernov@itp.nsc.ru

В представленной работе сформулирована замкнутая математическая модель роста парового пузырька в изначально однородно перегретой жидкости, одновременно учитывающая как динамические, так и тепловые эффекты и включающая в себя известные классические уравнения – уравнение Рэлея и уравнение энергии, записываемые применительно к рассматриваемой задаче с учетом специфики, связанной с процессом испарения жидкости. При построении модели использовались следующие допущения. Температура и давление пара в пузырьке полагались однородными. Пар в пузырьке считался неподвижным и находящимся в насыщенном состоянии в течение всего процесса. Схематически данный процесса изображен на рис. 1.

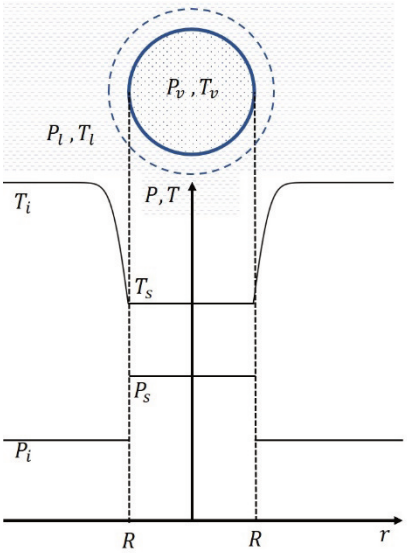


Рис. 1 Схематическое изображение процесса.

Показано, что представленная задача при переходе к переменным, в которых межфазная граница остается неподвижной, как это сделано в работах [1, 2], где исследовался рост газового пузырька, сводится к решению системы из трех обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, что значительно упрощает анализ всего рассматриваемого процесса и может послужить хорошей альтернативой прямым численным расчетам. Показано, что полученное решение хорошо согласуется с численным в широком диапазоне начальных перегревов и на всех стадиях процесса, включая переходную, учет которой необходим, особенно если рассматривать рост пузырька в сильно перегретой жидкости. Проиллюстрирована динамика изменения температурного поля в объеме жидкости, давления и плотности газа в пузырьке. Найдена зависимость радиуса пузырька от времени.

Показано, что на больших временах (в асимптотике) процесс роста пузырька определяется исключительно подводом тепла к межфазной границе. Температурное поле вокруг пузырька в предложенных в работе переменных становится стационарным, а решение тепловой задачи – автомодельным. Зависимость радиуса пузырька от времени принимает корневой вид, а коэффициент пропорциональности β зависит только от числа Якоба Ja, что соответствует известным решениям других авторов, в частности, решению Плессета-Цвика (см. рис. 2). Однако, как показывают расчеты, при определенных режимных параметрах процесса, в особенности, при больших значениях числа Якоба, данная стадия недостижима на обозримых временах (временах, характерных для процессов кипения в реальных условиях).

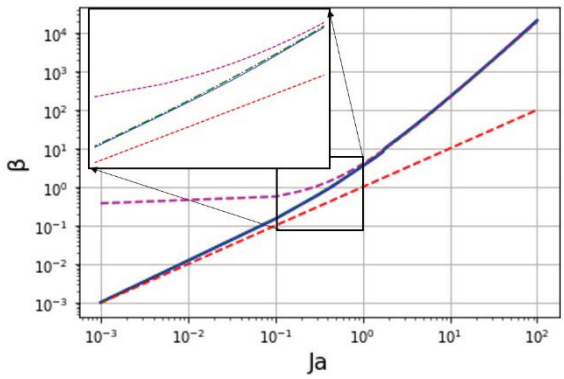


Рис. 2 Зависимость коэффициента β от числа Якоба Ja: сплошная линия – полученное решение; штриховые линии – известные асимптотические решения Рэлея (малые Ja) и Плессета-Цвика (большие Ja).

Таким образом, в работе найдено новое, сравнительно простое полуаналитическое решение задачи о росте парового пузырька в изначально однородно перегретой жидкости, которое одновременно описывает как инерционные, так и тепловые эффекты, сопутствующие данному процессу, и которое может стать хорошей альтернативой прямым численным расчетам.

Список литературы

1. Chernov A.A., Kedrinsky V.K., Pil'nik A.A. Kinetics of gas bubble nucleation and growth in magmatic melt at its rapid decompression // Physics of Fluids. 2014. V. 26. No 11. P. 116602.
2. Chernov A.A., Pil'nik A.A., Davydov M.N., Ermanyuk E.V., Pakhomov M.A. Gas nucleus growth in high-viscosity liquid under strongly non-equilibrium conditions // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018. V. 123. P. 1101–1108.

Работа поддержана РНФ (грант № 19-19-00122)

УДК 536.2

К РАСЧЁТУ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ ПЛЁНОЧНОЙ И КАПЕЛЬНОЙ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА НА ТРУБЕ С ИНТЕНСИФИКАТОРАМИ ТЕПЛООБМЕНА

Чугунков Д.В., Кузма-Кичта Ю.А., Сейфельмлюкова Г.А.

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

e-mail: chugunkovdv@mpei.ru

Теплоотдача при пленочной конденсации. При плёночной конденсации пара на наружной поверхности трубы с канавками интенсификация теплообмена обусловлена действием поверхностного натяжения на плёнку конденсата, которая стекает в канавки. Этот эффект усиливается при уменьшении относительного шага канавок, а также в случае волнового профиля трубы. В результате уменьшается толщина конденсатной плёнки на выступах трубы и её термическое сопротивление. Стекание конденсата в канавки снижает устойчивость плёнки и приводит к её срыву. Перераспределение конденсата по длине трубы ведёт к росту среднего коэффициента теплоотдачи. Рост коэффициента теплоотдачи тем больше, чем глубже канавки, чем меньше их шаг и радиус закругления выступающих частей труб. В [1] опытные данные по теплоотдаче при плёночной конденсации на трубе с интенсификаторами теплообмена описаны зависимостями, которые учитывают влияние основных параметров в исследованных условиях. На теплоотдачу при конденсации на трубе может оказать влияние материал стенки. Механизм этого влияния – неоднородное распределение температуры стенки в случае низкого коэффициента теплопроводности. Введение безразмерного комплекса

$$\frac{\lambda_c \cdot \delta_c}{\lambda_{пл} \cdot d_э} \qquad (1)$$

где λ_c, $\lambda_{пл}$ – коэффициенты теплопроводности материала стенки и пленки, δ_c – толщина стенки; $d_э$ – эквивалентный диаметр кольцевого канала, позволило обобщить данные по теплоотдаче при конденсации паров ряда жидкостей.

Теплоотдача для гладкой горизонтальной трубы описывается уравнением Нуссельта.

Теплоотдача при капельной конденсации. В основе расчёта коэффициента теплоотдачи при капельной конденсации пара лежат балансы тепла и массы для отдельной капли и эмпирические выражения, описывающие скорость роста капли и их распределение по поверхности.

При соприкосновении пара с поверхностью образуется адсорбционный слой, затем возникает полимолекулярная жидкая плёнка, которая находится под расклинивающим давлением. Расклинивающее давление обратно пропорционально примерно кубу толщины пленки. Локальное утонение плёнки приводит к увеличению расклинивающего давления по сравнению с соседними участками. В результате жидкость вытесняется на смежные участки, где и образуются первичные капли, размеры которых больше эффективного радиуса действия межмолекулярных сил. Равновесное давление насыщенного пара над выпуклой поверхностью раздела фаз больше, чем над плоской. Конденсация пара на сферической капле с радиусом R может происходить только при условии, что $R>R_к$, где $R_к$ – критический (минимально возможный) радиус кривизны поверхности раздела фаз. В общем случае на поверхности стенки в каждый момент времени может возникнуть множество капель, радиус которых изменяется от критического $R_к$ до отрывного $R_о$. Непрерывное увеличение размеров капель за счёт конденсации и слияния компенсируется возникновением новых (первичных) и исчезновением крупных (достигших отрывного размера).

Для расчёта необходимо знать функции роста капель и их распределения по размерам. Эти функции определяются для различных условий как аналитически, так и экспериментально.

Средний коэффициент теплоотдачи при капельной конденсации неподвижного пара может быть описан уравнениями, предложенными Исаченко В.П.[3]. Параметр ξ, описывающий изменение поверхностного натяжения в этих уравнениях, определялся в зависимости от температурного градиента.

Расчёт показывает, что коэффициент теплоотдачи при капельной конденсации может быть до 10 раз больше, чем при плёночной. Максимум на зависимости $\alpha(\Delta t)$ объясняется следующим образом. Сначала чем больше величина Δt, тем больше пересыщение пара и тем интенсивнее происходит конденсация. При этом, термическое сопротивление конденсата сравнительно невелико. Повышение скорости конденсации с ростом величины Δt и увеличение количества конденсированной фазы на поверхности теплообмена приводят к тому, что термическое сопротивление конденсата начинает оказывать большее влияние на процесс теплоотдачи и она понижается.

При наличии в паре воздуха или других неконденсирующихся газов теплоотдача при конденсации сильно снижается. Это происходит вследствие того, что на холодной стенке конденсируется только пар, а воздух остается. При отсутствии конвекции с течением времени воздух скапливается около стенки и оказывает значительное препятствие продвижению пара к стенке.

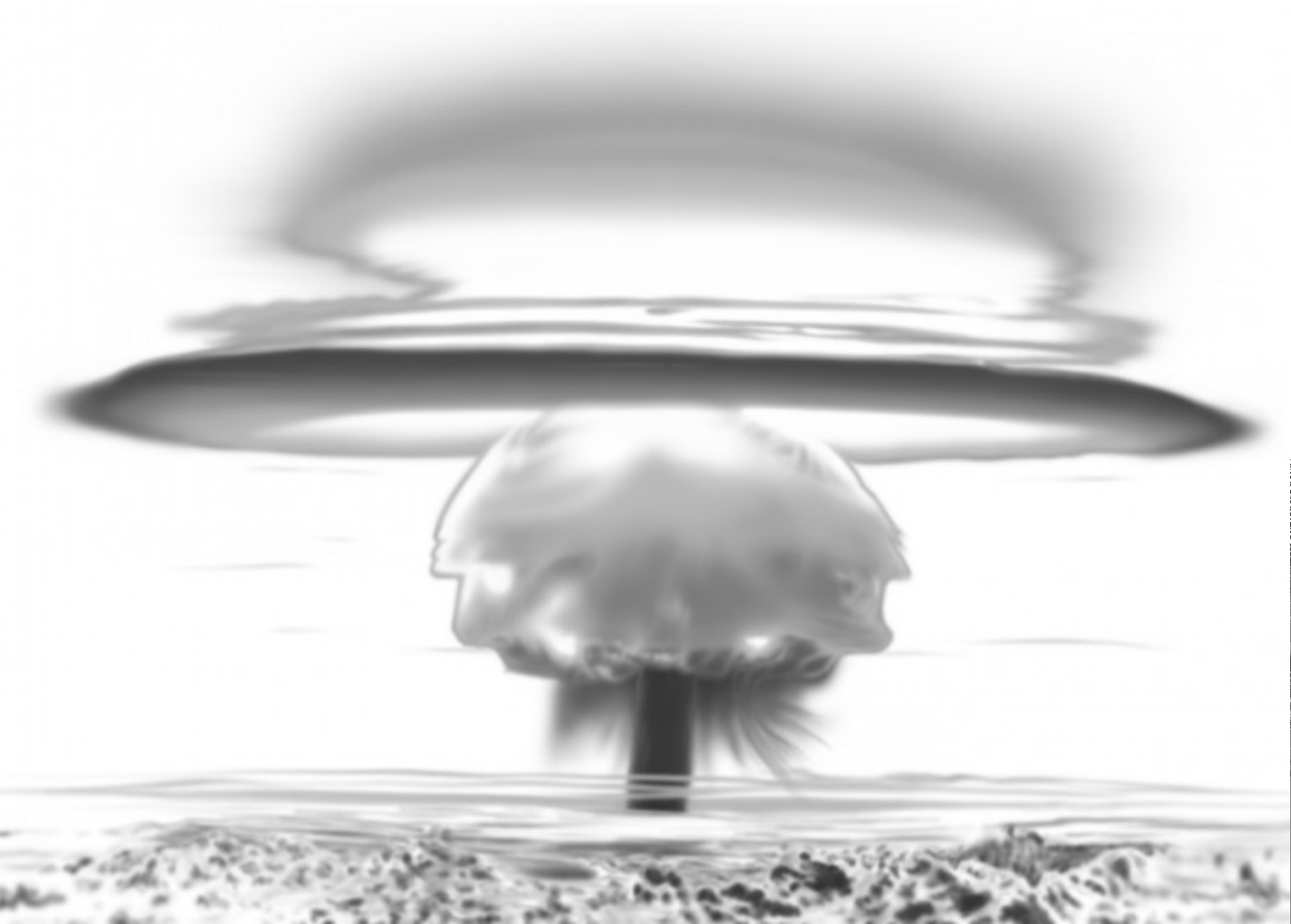
Список литературы

1. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Копп И.З., Мякочир А.С. Эффективные поверхности теплообмена. Энергоатомиздат. 1998.
2. Исаченко В.П., Солодов А.П., Мальцев А.П., Якушева Е.В. Асимптотический анализ капельной конденсации. Теплофизика высоких температур. Т. 22. 1984.
3. Исаченко В.П. Теплообмен при конденсации. М.: «Энергия». 1977. 240 с.
4. Дзюбенко Б.В., Кузма-Кичта Ю.А., Леонтьев А.И. и др. Интенсификация тепло- и массообмена на макро-, микро- и наномасштабах // Под. ред. Кузмы-Кичты Ю.А. М.: ФГУП ЦНИИАТОМИНФОРМ. 2008. 532 с.

Работа поддержана Минобрнауки России (Шифр научной темы FSWF-2020-0021)



СЕКЦИЯ 4
Гидрогазодинамика реагирующих сред, детонационные процессы



УДК 662.739

ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСПЫЛЕНИЯ СПИРТОВОДОУГОЛЬНЫХ ТОПЛИВ

Гвоздяков Д.В., Зенков А.В.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

e-mail: dim2003@tpu.ru

Известно [1], что в последнее десятилетие становится привлекательным отказ от традиционного сжигания угля при производстве электрической энергии и переход на водоугольные топлива (ВУТ).

В последние годы опубликованы результаты (например, [2]) многочисленных экспериментальных и теоретических исследований процессов распыления многокомпонентных топлив в камерах сгорания паровых и водогрейных котлов с целью снижения характерных размеров капель распыляемых топлив. Данные о влиянии спиртов в составе водоугольных суспензий на характеристики струи в процессе пневмомеханического распыления таких топлив (СВУТ) в литературе отсутствуют.

Целью работы является обоснование по результатам экспериментального определения распределения капель водоугольных суспензий с добавками этилового или изоамилового спирта по скоростям и размерам в процессе пневмомеханического распыления эффективности использования этих спиртов в качестве третьих компонент водоугольных топлив, существенно улучшающих технологию распыления.

Исследовавшиеся СВУТ и ВУТ готовились на основе бурого угля Канско-Ачинского угольного бассейна. Высокоскоростная визуализация основных характеристик струи (скоростей движения капель, их размеров и концентрация) распыленных водоугольных топлив выполнена с использованием методик [3] – Particle Image Velocimetry (PIV) и Interferometric Particle Imaging (IPI).

В результате выполненных экспериментальных исследований процесса пневмомеханического распыления водоугольных суспензий с относительно небольшими (не более 3% по массе) добавками этилового и изоамилового спирта и обычного ВУТ получены основные необходимые для анализа и сравнения характеристики струи – распределение капель по скоростям и размерам, концентрация.

На основе полученных экспериментальных данных можно сделать заключение о том, что замещение воды в составе водоугольного топлива на достаточно типичные спирты приводит к снижению (на 15–18 ± 0,4%) скоростей капель спиртоводоугольных суспензий в сравнении с типичным ВУТ. В области исследования от 25 до 100 мм по осевой координате распределение капель распыленных топлив по размерам показано на рис. 1.

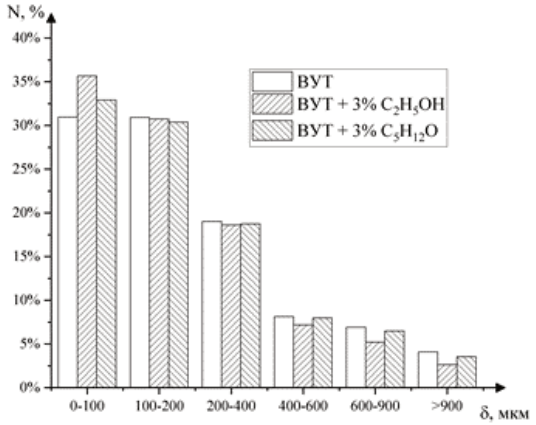


Рис. 1. Распределение скоростей капель ВУТ в ядре струи.

Установлено, что при распылении спиртоводоугольных суспензий концентрация капель топлива размером до 200 мкм увеличивается на 7±0,2% для ВУТ с добавкой этилового спирта и на 2±0,2% водоугольной суспензии с добавкой изоамилового спирта в сравнении с обычным водоугольным топливом. Число достаточно малых (до 100 мкм) капель топлива увеличивается на 13,4±0,2% и на 6,6±0,2% для ВУТ с добавкой этилового спирта и изоамилового спирта соответственно. Относительно небольшие добавки спиртов в состав водоугольной суспензии приводит к ослаблению связей между молекулами воды, что проявляется в росте скорости испарения жидкости с поверхности капель топлива и в свою очередь является причиной снижения их размеров при распылении водоугольных суспензий с добавкой спирта в сравнении с обычными двухкомпонентными ВУТ.

Список литературы

1. Glushkov, D.O., Strizhak, P.A., Chernetskii, M.Y. Organic coal-water fuel: Problems and advances (Review) // Thermal Engineering. 2016. V. 63(10). P. 707–717.
2. Ya. Solomatin, N.E. Shlegel, P.A.Strizhak. Atomization of promising multicomponent fuel droplets by their collisions // Fuel. V. 255. 1 November 2019. 115751.
3. I.S. Anufriev, E.Yu. Shadrin, E.P. Kopyev, S.V. Alekseenko, O.V. Sharypov. Study of liquid hydrocarbons atomization by supersonic air or steam jet // Applied Thermal Engineering. V. 163. 2019. 114400.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-29-24099/18

УДК 621.9

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОРЕНИЯ ПЫЛЕВИДНОГО ТОРФА В ЗАКРУЧЕННОМ ПРОТИВОТОЧНОМ ТЕЧЕНИИ

Евдокимов О.А.[1], Михайлов А.С.[2], Гурьянов А.И.[1], Прохоров Д.А.[1]

[1] Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева, Рыбинск
[2] ООО «ГК РегионЭнерго», Рыбинск

e-mail: yevdokimov_oleg@mail.ru

Анализ публикаций последних лет показывает, что перспективным направлением в физике процессов горения является сжигание пылевидного топлива в закрученном воздушном потоке. Размолотое до состояния мелкодисперсной пыли топливо совместно с транспортным воздухом подается в зону горения, где формируется пилотный стабилизирующий факел. Основной расход воздуха подается в горелку в виде интенсивно закрученного потока, что приводит к разбавлению топливовоздушной смеси до необходимого концентрационного соотношения. Такая организация процесса сжигания пылевидного топлива характеризуется более качественным перемешиванием компонентов, повышением полноты сгорания, снижением выбросов загрязняющих атмосферу веществ по сравнению с классическим слоевым сжиганием.

Несмотря на то, что закрученные течения в настоящее время широкое применение при проектировании устройств сжигания твердого топлива, в приложениях физики горения практически не используются такие особенности закрученного потока, как энергоразделение и формирование противоточного течения. Анализ экспериментальных и расчетно-аналитических работ показывает, что противоточные течения имеют развитую область стабилизации на границе раздела потоков, перемещающихся в противоположных направлениях. При этом периферийное течение обеспечивает конвективное охлаждение стенок [1].

В настоящей работе предложен новый принцип организации горения твердого пылевидного торфа в условиях закрученного противоточного течения, разработан горелочный модуль, реализующий данный принцип, а также выполнены экспериментальные и численные исследования процесса горения на различных рабочих параметрах [2].

Проведенные экспериментальные исследования показали, что наличие противоточного течения значительно влияет на расположение зоны горения, полноту сгорания и эмиссионные характеристики. Это обусловлено тем, что в условиях двух закрученных потоков, движущихся навстречу друг другу в горелочном устройстве, существенно повышается качество смесеобразования, а также время пребывания частиц топлива в зоне реакций. В зависимости от режима работы, противоточное горелочное устройство может обеспечить устойчивое горение пылевидного топлива как непосредственно внутри самого себя, так и в высокоэнтальпийной струе продуктов сгорания за выходным соплом для воспламенения и стабилизации пламени в топке котла, где оно установлено. В то же время эмиссионные выбросы оксидов азота NO_x в обоих указанных случаях не превышают 25 ppmб что полностью соответствует Директиве 2008/1/ЕС Европарламента и Совета ЕС от 15 января 2008 г. для торфосжигающих промышленных установок.

Экспериментально показано, что наиболее экологически чистым режимом работы противоточной вихревой горелки является режим, соответствующий коэффициенту избытка воздуха $\alpha_\Sigma \approx 1.3$ и характеризуемый значениями монооксида углерода 1400 ppm и оксидов азота 6 ppm при номинальной мощности на уровне 6.5 кВт. Обеднение топливовоздушной смеси приводит к некоторому возрастанию эмиссии CO и практически полному отсутствию эмиссии NO_x, в то время как процесс горения остается достаточно стабильным.

Отработана расчетная постановка, позволяющая достаточно точно прогнозировать описанные экспериментальные режимы горения торфа в закрученном противоточном течении, как с точки зрения границ устойчивой работы, так и эмиссионных характеристик.

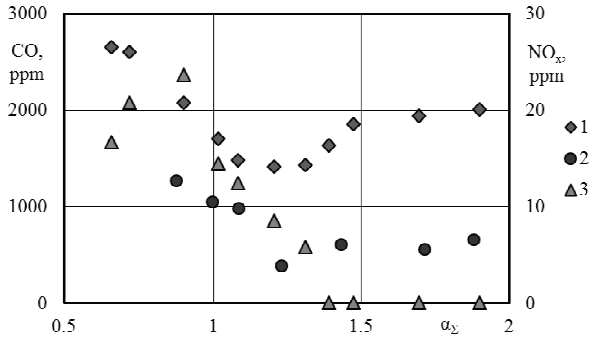


Рис. 1. Зависимости эмиссии монооксида углерода и оксидов азота от интегрального коэффициента избытка воздуха противоточного горелочного устройства для режимов по мощности: 1 – CO при N = 6,5 кВт; 2 – CO при N = 3,6 кВт; 3 – NOx при N = 6,5 кВт

Список литературы

1. Guryanov A.I., Piralishvili Sh.A., Guryanova M.M., Evdokimov O.A., Veretennikov S.V. Counter-current hydrogen–oxygen vortex combustion chamber. Thermal physics of processing // Journal of the Enregy Institute. 2020. Vol. 93(2). P. 634–641.
2. Evdokimov O.A., Guryanov A.I., Mikhailov A.S., Veretennikov S.V. A numerical simulation of burning of pulverized peat fuel in a bidirectional vortex combustor // Thermal Science and Engineering Progress. 2020. V. 17. P 100510.

Работа поддержана Грантом Президента РФ (грант № МК-1774.2019.8)

УДК 662.71/74.040.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПИРОЛИЗА ДРЕВЕСНОЙ ЩЕПЫ В СЛОЕВОМ РЕАКТОРЕ

Козлов А.Н.[1], Пензик М.В.[1], Свищев Д.А.[1], Баденко В.В.[2]

[1] Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск
[2] Иркутский национальный исследовательский технический университет

e-mail: Kozlov@isem.irk.ru

Одним из важных процессов термохимической конверсии биомассы является пиролиз, который зависит от условий проведения процесса. В зависимости от условий проведения пиролиза можно проводить процесс в сторону получения жидких продуктов, древесного угля, либо генераторного газа с определенными характеристиками. При этом в зависимости от целевого продукта необходимо минимизировать образования других продуктов, которые являются нежелательными. Так при получении древесного угля необходимо минимизировать количество образующихся смолистых веществ и утилизировать генераторный газ.

Работа направлена на определение оптимальных параметров эффективности процесса пиролиза древесной щепы., обеспечивающих минимальное количество смолистых соединений. Типичное количество образующейся смолы в слоевом реакторе пиролиза составляет 20 – 35 %.

Для решения данной цели предложена новая концепция проведения пиролиза в слое. Проведены вариативные эксперименты при разной температуре пиролиза.

В результате решения поставленных задач предложена новая концепция слоевого реактора, минимизирующая образование смолистых соединений с одновременным увеличением выхода генераторного газа. Исследована его работа при разных температурах пиролиза (360, 400, 440, 480, 520°C). Установлено, что при температуре 480°C, достигаются максимальные показатели по теплотворной способности генераторного газа (12,69 MJ/m3) и эффективности (MGE – 84.9%, CGE – 25.8%). При этом количество образующейся смолы минимально (2,6%). В тоже время, дальнейшее увеличение температуры процесса приводит к снижению показателей. Определено, что с увеличением температуры пиролиза выход древесного угля уменьшается с 36% до 27,5%, выход генераторного газа увеличивается с 11,1% до 19,5%. %. В тоже время выход воды увеличивается с 19,6 % до 26,2% за исключением процесса пиролиза, проведенного при 400°C (15,8%). Выход смолы уменьшается с 11.3 % при 360°C до 2,6% при 480°C, а затем увеличивается до 3,6% при 520°C. Низкий выход смолы обусловлен конструкцией экспериментальной установки, при которой часть смолы возвращается в реактор и карбонизируется на поверхности древесного угля. Определены технические характеристики и морфология древесного угля. Показано, что при 480°C наблюдается максимальный размер пор, образующихся при выходе летучих.

Работа поддержана РФФИ (грант № 19-58-80016);

Department of Science and Technology of India (DST) № CRG/2018/004610, DST/TDT/TDP-011/2017;

Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China (MOST) № 2018YFE0183600;

National Research Council of Brazil (CNPq) № 402849/2019-1;

National Research Foundation of South Africa (NRF),№ BRIC190321424123.

Исследования выполнены на оборудовании ЦКП «Высокотемпературный контур».

УДК 536.46:629.194.632.1

ТЕРМИЧЕСКОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ И ЗАЖИГАНИЕ ВЭМ, СОДЕРЖАЩИХ БОРИДЫ МЕТАЛЛОВ

Коротких А.Г.[1,2], Сорокин И.В.[1], Селихова Е.А.[1], Архипов В.А.[2]

[1] Национальный исследовательский Томский политехнический университет
[2] Национальный исследовательский Томский государственный университет

e-mail: korotkikh@tpu.ru

Порошки бора и боридов металлов являются наиболее перспективными компонентами твердого и гибридного ракетного топлива за счет их высоких значений удельной энергии, выделяемой в процессе окисления и горения. Среди металлических горючих твердых топлив, используемых в аэрокосмической промышленности, бор имеет высокие значения массовой и объемной теплоты сгорания (~58 кДж/г и 136 кДж/см^3, соответственно) [1], что примерно в 2 раза выше по сравнению с алюминием. При этом частицы бора имеют длительные времена зажигания и сгорания за счет образования инертного оксидного слоя на поверхности частицы, что, в конечном счете, приводит к неполному выгоранию частиц при движении их в камере сгорания. Температуры плавления и кипения оксида бора составляют 450 и 1860°C [2, 3], соответственно, что значительно ниже значений температур для чистого бора (2075 и 3658°C [1]).

Одним из способов интенсификации процессов зажигания и горения бора в камере сгорания является применение легковоспламеняющихся и быстрогорящих металлов, которые можно использовать в качестве механосмесей или сплавов. Использование композиций металл/бор, например Al/B, Mg/B, Mg/Al/B, Zn/B, Fe/B, Cu/B, либо их оксидов способствует ускорению окисления бора, позволяет существенно снизить времена задержки зажигания и увеличить полноту сгорания частиц горючего [4, 5]. Особый интерес представляют бориды алюминия, титана и магния, которые можно рассматривать в качестве компонентов высокоэнергетических материалов (ВЭМ), благодаря их высокой теплоте сгорания (на уровне бора) и лучшей воспламеняемости [6, 7].

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования характеристик термического разложения и зажигания ВЭМ на основе двойного окислителя, активного горючего-связующего, содержащих микроразмерные порошки боридов алюминия AlB_2 и AlB_{12}, титана TiB_2, а также аморфного бора и алюминия.

Измерение температур начала, конца, интенсивного разложения, скорости химических реакций, изменения массы исследуемых образцов ВЭМ проводилось с использованием совмещенного ТГА/ДСК/ДТА анализатора Netzsch STA 449 F3 Jupiter в аргоне при скорости нагрева печи 2, 10 и 20°C/мин. в керамических тиглях. Температуру на поверхности реакционного слоя и время задержки зажигания цилиндрических образцов ВЭМ в момент появления пламени измеряли на экспериментальном стенде, состоящем из CO_2-лазера непрерывного действия максимальной мощностью 200 Вт с длиной волны излучения 10.6 мкм, и системы регистрации параметров зажигания.

Данные ТГ-ДСК анализа исследуемых образцов ВЭМ показали, что составы топлив начинают реагировать при температуре ~100–120 °C за счет начала разложения полимерного активного связующего вещества. При увеличении температуры печи до 210–250 °C скорость химических реакций при разложении ВЭМ увеличивается и достигает максимальных значений за счет начала разложения окислителей (ПХА и НА). Все экзо- и эндотермические реакции разложения образцов топлив проходят в диапазоне температур до 400 °C, при этом добавки металлического горючего окисляются при температурах выше 600 – 700 °C.

В результате исследования лазерного зажигания ВЭМ установлено, что при замене порошка алюминия на аморфный бор и бориды алюминия AlB_2 и AlB_{12} в составе СТТ времена задержки зажигания образцов в диапазоне плотности теплового потока q = 90–200 Вт/см^2 значительно снижаются в 2.2–2.8 и 1.7–2.2 раза, соответственно, а максимальные значения температур на поверхности реакционного слоя топлив в момент появления пламени увеличиваются на ~100 °C. Отличие времени задержки зажигания ВЭМ с диборидом титана TiB_2 от базового состава ВЭМ с Al незначительно и составляет 10–25 %.

Список литературы

1. Энергоемкие горючие для авиационных и ракетных двигателей // Под ред. Л.С. Яновского. М.: Физматлит. 2009. 400 с.
2. Liang D., Liu J., Zhou Y., Zhou J. Ignition and combustion characteristics of amorphous boron and coated boron particles in oxygen jet // Combust. Flame. 2017. V. 185 P. 292–300.
3. Xizheng Wang X., Wu T., Wang H., DeLisio J.B., Yang Y., Zachariah M.R. Boron ignition and combustion with doped δ-Bi2O3: Bond energy/oxygen vacancy relationships // Combust. Flame. 2018. V. 197 P. 127–133.
4. Chintersingh K.-L., Schoenitz M., Dreizin E.L. Boron doped with iron: Preparation and combustion in air // Combust. Flame. 2019. V. 200 P. 286–295.
5. Hashim S.A., Karmakar Sr., Roy A. Effects of Ti and Mg particles on combustion characteristics of boron–HTPB-based solid fuels for hybrid gas generator in ducted rocket applications // Acta Astronaut. 2019. V. 160. P. 125–137.
6. Lianga D., Xiaoa R., Liub J., Wang Y. Ignition and heterogeneous combustion of aluminum boride and boron–aluminum blend // Aerospace Sci. Technol. 2019. V. 84. P. 1081–1091.
7. Shaik Adil, Murty B.S. Effect of milling on the oxidation kinetics of Aluminium + Boron mixture and nanocrystalline Aluminium Boride (AlB_{12}) // Thermochim. Acta. 2019. V. 678. Article 178306.

Работа поддержана РФФИ (грант № 20-03-00588)

УДК 536.46:662.61

ЛАЗЕРНОЕ ЗАЖИГАНИЕ ВРАЩАЮЩИХСЯ ОБРАЗЦОВ ВЭМ, СОДЕРЖАЩИХ АЛЮМИНИЙ

Коротких А.Г.[1,2], Сорокин И.В.[1], Селихова Е.А.[1], Архипов В.А.[2]

[1] Национальный исследовательский Томский политехнический университет
[2] Национальный исследовательский Томский государственный университет

e-mail: ivans3485@gmail.com

Исследование зажигания высокоэнергетических материалов (ВЭМ) – твердых топлив для ракетных двигателей и газогенераторов, взрывчатых веществ, полимерных материалов – широко используется в лабораторной практике для оценки их воспламеняемости, а также при определении количественных характеристик процесса (время задержки зажигания и макрокинетические параметры) [1–6].

Одним из основных допущений при обработке результатов экспериментов по зажиганию образцов ВЭМ высокоинтенсивным лазерным излучением является равномерность плотности теплового потока по поверхности образца. Распределение интенсивности излучения в выходной апертуре лазера определяется типом используемого резонатора и модовым составом возбужденных в нем колебаний. При генерации на модах высокого порядка распределение интенсивности излучения существенно неравномерно [7]. Неравномерность распределения теплового излучения приводит к появлению глубоких пор в «горячих» точках на облучаемой поверхности исследуемого образца. При этом процесс зажигания первоначально развивается в порах, где условия воспламенения существенно отличаются от условий на плоской поверхности образца. Этот эффект может привести к изменению физики процесса зажигания ВЭМ, к неопределенности результатов экспериментов, а также к погрешностям определения констант формальной кинетики процесса зажигания из решения соответствующей обратной задачи, сформулированной для равномерного потока излучения на поверхности образца [8].

В работе представлены экспериментальные данные по зажиганию составов ВЭМ с применением нового метода исследования, основанного на усреднении потока лазерного излучения путем вращения образца цилиндрической формы вокруг своей оси. В исследовании использовали два состава ВЭМ на основе перхлората аммония (ПХА) и бутадиенового каучука, содержащие микроразмерный Al и ультрадисперсный Alex порошки алюминия.

Зажигание цилиндрических образцов ВЭМ диаметром 10 мм осуществляли лазерным лучом с длиной волны излучения 10.6 мкм и диаметром, равным диаметру образца, в диапазоне плотности теплового потока $q = 70–210$ Вт/см^2. Исследуемый образец ВЭМ крепился к держателю вала электродвигателя. Для исключения влияния конвективного теплообмена с окружающей средой на характеристики зажигания образец размещался в цилиндрической стеклянной трубке. Исследуемый образец вращался с постоянной угловой скоростью 2800 об/мин. В опытах определяли времена задержки зажигания t_{ign} ВЭМ по моменту времени появления пламени вблизи поверхности образца ВЭМ при разной плотности теплового потока излучения.

Результаты проведенного исследования показали, что времена задержки зажигания t_{ign}. вращающихся образцов ВЭМ увеличиваются при одинаковых параметрах лазерного луча, за счет равномерного распределения плотности теплового потока излучения по поверхности вращающегося образца и сглаживания локальных разогретых пятен. Установлено, что время задержки зажигания вращающегося образца ВЭМ с Alex увеличивается в 1.1–1.4 раза по сравнению с неподвижным образцом (см. рис. 1), а в случае с образцом с Al отношение t_{ign} с вращением образца к t_{ign} неподвижного образца составляет 1.1–1.5 в зависимости от q.

Список литературы

1. Страковский Л.Г., Фролов Е.И. Особенности зажигания полупрозрачных летучих ВВ монохроматическим световым потоком // ФГВ. 1980. Т. 16. № 5. С. 140–147.
2. Maggi F., Bandera A., Galfetti L., De Luca L.T., Jackson T.L. Efficient solid rocket propulsion for access to space // Acta Astronaut. 2010. V. 66. P. 1563–1573.
3. Akhmetshin R., Razin A., Ovchinnikov V., Skripin A., Tsipilev V., Oleshko V., Zarko V., Yakovlev A. Effect of laser radiation wavelength on explosives initiation thresholds // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. V. 552. No. 1. 012015.
4. Коротких А.Г., Архипов В.А., Слюсарский К.В., Сорокин И.В. Исследование зажигания высокоэнергетических материалов с бором и диборидами алюминия и титана // ФГВ. 2018. Т. 54. № 3. С. 109–115.
5. Бачурин Л.В., Колесов В.И., Коновалов А.Н., Ульянов В.А., Юдин Н.В. Нагрев энергетических материалов непрерывным лазерным излучением ближнего ИК-диапазона // ФГВ. 2018. Т. 54. № 4. С. 84–95.
6. Шейков Ю.В., Батьянов С.М., Калашникова О.Н., Луковкин О.М., Мильченко Д.В., Вахмистров С.А., Михайлов А.Л. О механизме инициирования алюминизированных бризантных взрывчатых веществ лазерным излучением // ФГВ. 2018. Т. 54. № 5. С. 57–64.
7. Жаботинский М.Е. Квантовая электроника. Маленькая энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1969. 432 с.
8. Вилюнов В.Н. Теория зажигания конденсированных веществ. Новосибирск: Наука, 1984. С. 189 с.

Работа поддержана РФФИ (грант № 20-03-00580)

УДК 544.478.12

ВЛИЯНИЕ НИТРАТОВ МЕТАЛЛОВ НА ПРОЦЕСС ОКИСЛЕНИЯ УГЛЕЙ РАЗЛИЧНОЙ СТАДИИ МЕТАМОРФИЗМА

Ларионов К.Б.[1], Громов А.А.[2]

[1] Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск
[2] Национальный исследовательский технологический университет МИСиС, Москва

e-mail: laryk070@gmail.com

Согласно данным всемирного энергетического агенства [1] уголь, является доминирующим видом энергетического ресурса, используемого в качестве первичного топлива для выработки электроэнергии. Доля потребления угля от общего количества энергетических ресурсов по данным 2017 года составила около 39%. Не смотря на общепринятую энергетическую политику, направленную в сторону сокращения доли использования угля и переход на возобновляемые источники энергии, уголь, как основной вид топлива, будет занимать лидирующую позицию в структуре генерации энергетических мощностей. Учитывая данные факты, развитие технологий термического преобразования угля, в частности его сжигания, является приоритетной задачей для угольной энергетики с целью обеспечения экономичного и экологически устойчивого производства. Одним из технических решений повышения эффективности сжигания угля является применение каталитически активных агентов для интенсификации процесса горения [2]. Согласно работе [3] в качестве эффективных активирующих добавок являются предшественники оксидов металлов в виде различных солей.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования влияния нитратов различных металлов (Cu, Ce, Na, Co, Fe) на процесс окисления углей различной стадии метаморфизма.

В работе были использованы образцы бурого (УБ) и каменного углей (УК) Бородинского угольного разреза и шахты «Алардинская» соответственно. Исходные образцы измельчали в шаровой мельнице и затем фракционировали на ситах с размером ячеек менее 80 мкм. Технические характеристики исследуемых образцов определялись с применением стандартных методик [4] и приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики исследуемых углей.

Показатель	Образец	
	УБ	УК
Внешняя влага, мас.%	1,0	0,3
Выход летучих веществ, мас.%	39,8	13,1
Зольный остаток, мас.%	4,5	16,5
Содержание углерода, мас.%	54,7	70,1

Активирующие добавки нитаратов металлов ($Cu(NO_3)_2$, $Ce(NO_3)_3$, $Co(NO_3)_2$, $NaNO_3$, $Fe(NO_3)_2$) наносились на образцы угля методом пропитки по влагоемкости. В качестве раствора для предварительного растворения добавок использовались вода и спирит в объемном соотношении 1:1. После смешения добавок и углей, образцы высушивались при температуре 105°C до постоянной массы. Содержание добавок в исследуемых образцах углей составляло 5 мас.%.

Экспериментальное исследование проводилось с помощью синхронного термического анализатора Netzsch STA 449 F3 Jupiter (Germany). Все эксперименты были выполнены в идентичных условиях при температуре 2,5°C/мин в корундовом тигле (масса образца 7 мг) в интервале температур 25-600°C. В качестве окислительной среды была использована смесь воздуха и азота со скоростью потоков 60 мл/мин и 10 мл/мин, соответственно.

На рисунке 1 представлены данные ТГ, характеризующие процесс окисления бурого и каменного углей, модифицированных различными добавками нитратами металлов.

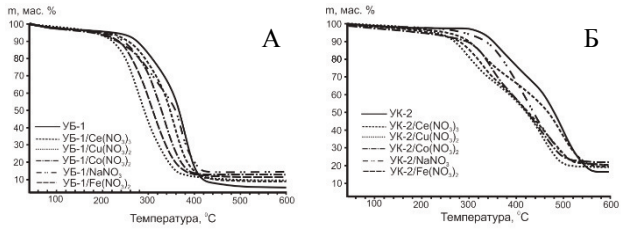


Рис. 1. Данные ТГ для процесса окисления углей, модифицированных нитратами различных металлов. А – образцы серии УБ; Б – образцы серии УК.

Видно, что все нанесенные добавки оказывают положительный эффект на температуру начала процесса интенсивного окисления углей T_i. При этом протекание процесса имеет различный характер в зависимости от типа рассматриваемых углей. Наибольшее изменение процесса окисления наблюдалось для образцов каменного угля, модифицированных добавками $Cu(NO_3)$, $Fe(NO_3)_2$ и $Co(NO_3)_2$. В целом изменение параметра T_i составило 5-97°C в зависимости от типа углей и наносимых добавок.

Список литературы

1. International Energy Agency. Coal information, http://www.iea.org/statistics/?country=WORLD&year=2016&category=Electricity&indicator=ElecGenByFuel&mode=chart&dataTable=ELECTRICITYANDHEAT [accessed 02 March 2020].
2. Parmon V.N., Simonov A.D., Sadykov V.A., Tikhov S.F. Catalytic combustion: achievements and problems // Combust. Explos. Shock. Waves. 2015. V. 51. № 2. P. 143–150.
3. Zhao G. W., Yu W. Q., Xiao Y. H. Study on brown coal pyrolysis and catalytic pyrolysis // Advanced Materials Research. 2011. V. 236–238. P. 660–663.
4. Tabakaev R., Kanipa I., Astafev A., Dubinin Y., Yazykov N., Zavorin A., Yakovlev V. Thermal enhancement of different types of biomass by low temperature pyrolysis // Fuel. 2019. V. 245. № 5. P. 29–38.

Работа поддержана РФФИ (грант № 18-29-24099/18) и грантом Президента РФ (грант № НШ-2513.2020.8)

УДК 628.475

ПАРОВАЯ ГАЗИФИКАЦИЯ ИЗНОШЕННЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ЦЕННЫХ ПРОДУКТОВ

Ларионов К.Б., Слюсарский К.В., Янковский С.А., Губин В.Е.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

e-mail: laryk070@gmail.com

Постоянный рост парка автомобилей во всех развитых странах мира приводит к накоплению изношенных автомобильных шин. Объем накопленных в мире шинных отходов к 2017 году составлял более 80 млн. тонн. Ежегодно в мире выходят из употребления более 10–15 млн. тонн покрышек. Это приводит к возникновению глобальной проблемы, связанной с ежегодным увеличением отработанных шин, которые являются серьезным источником экологического загрязнения окружающей среды, так как они не относятся к биоразлагаемым материалам и запрещены к прямому захоронению на свалках ввиду их высокого класса опасности. Наиболее простым способом утилизации данного вида отхода является прямое сжигание на энергетических объектах, что может, однако, нанести серьезный вред окружающей среде из-за уноса золы, сажи, тяжелых металлов и образования высоких концентраций сернистых газов, а также сверхтоксичных соединений – диоксинов и полиароматических углеводородов. К недостаткам данного способа также можно отнести и широкий диапазон температурных колебаний процесса горения, что ведет к неполноте сгорания резины. Одним из наиболее перспективных направлений утилизации резинотехнических отходов, является их рециклинг методом термического разложения с использованием перегретого пара (газификация), направленного на получение полезных продуктов в виде технического углерода, жидкого и газофазного топлив.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования полезных продуктов паровой газификации отработавших автомобильных щин.

В качестве исследуемого образца использовались резинотехнические отходы (РТО) полученные после измельчения (размером до 0,05 см) изношенных шин легковых автомобилей. Физико-химические характеристики исходного образца приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики исследуемого образца.

Показатель	Значение
Технические характеристики, мас.%	
Влажность	0,6
Зольность	3,2
Элементный состав, мас.%	
C	85,4
H	6,9
N	-
S	1,6
O	2,3

Описание экспериментальной установки и методика проведения эксперимента приведена в нашей предыдущей работе [1]. Паровая газификация исследуемого образца изношенных автомобильных шин проводилась при температуре пара 500°C с расходом 5 кг/ч с временной выдержкой 1 час. Масса образца составляла 0,5 кг.

В виде полезных продуктов паровой газификации образца были получены: углерод (32,9 мас.%), жидкие углеводороды (54.9 мас.%) и газофазные продукты (12,2 мас.%).

Аналитическое исследование характеристик полученных полезных продуктов показало, что углерод частично соответствует ГОСТ 7885-86 и сопоставим с техническим углеродом марок П324 и П514.

Жидкие углеводороды также отвечают нормативным требованиям ГОСТ 10585-2013 и являются аналогом топочного мазута марки М100. При этом для данного вида топлива было установлено, что температура его замерзания составляет около –45°C, что является важным показателем для жидкого топлива, используемого в низкотемпературных погодных условиях.

В составе газофазных продуктов паровой газификации были обнаружены следующие компоненты: CH_4 (более 30 об.%), H_2 (около 25 об. %), CO (около 20 об.%), CO_2 (8 об.%). Данный вид продукта при промышленном масштабировании технологии может использоваться для частичной компенсации топливных затрат, направленных на собственные производственные нужды (генерация пара).

Дальнейшие перспективы исследований совершенствования получаемых полезных продуктов и минимизации технологических рисков по мнению авторского коллектива должны быть сосредоточены в следующих направлениях:

1. Научно-техническая и технико-экономическая проработка подходов и методов по извлечению или минимизации из углерода минеральной (неорганической) части и содержания серы S.

2. Исследование влияния режимных параметров (температура, расход греющей среды, тип сырья и др.) на процесс паровой газификации и значения физико-химических характеристик, получаемых полезных продуктов.

3. Для обеспечения устойчивой экологической работы при масштабировании технологии паровой газификации РТО должна быть предусмотрена система очистки технологической воды после ее отделения от углеводородной жидкой фракции с целью обратного возвращения в технологический цикл или в систему водоотведения (канализацию).

Список литературы

1. Kaltaev A.Z., Larionov K.B., Yankovsky S.A., Slyusarsky K.V., Gubin V.E. Production of black carbon by steam pyrolysis (thermolysis) method of rubber waste in the form of worn-out automobile tires//AIP Conference Proceedings. 2020. V. 2212. P. 020023.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, в рамках реализации проекта FSWW-2020-0022.

УДК 544.478.12

СНИЖЕНИЕ ВЫДЕЛЕНИЯ ОКСИДА УГЛЕРОДА И ТОПЛИВНОГО НЕДОЖОГА ПРИ АКТИВИРОВАННОМ ГОРЕНИИ УГЛЯ

Ларионов К.Б.[1,2], Мишаков И.В.[3], Громов А.А.[2]

[1] Национальный исследовательский Томский политехнический университет
[2]Национальный исследовательский технологический университет МИСиС, Москва
[3]Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск

e-mail: laryk070@gmail.com

Каталитическое сжигание твердого топлива – современный способ термического преобразования химической энергии топлива в тепловую, отличающийся высокой глубиной конверсии за счет интенсификации процесса горения при сравнительно низких температурах [1]. Каталитическое сжигание способствует снижению концентраций образующихся оксидов азота [2] и доокисления монооксида углерода [3] в уходящих газофазных продуктах горения. В качестве каталитических агентов горения углеводородного сырья в промышленных условиях, как правило, применяются металлооксидные добавки, а также их композиты, нанесенные на инертные носители типа Al_2O_3. Не смотря на широкое распространение использования оксидов металлов, их предшественники, в виде солей, могут оказывать более существенное воздействие на процесс термического преобразования твердых топлив [4].

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования влияния активирующих добавок солей (нитрат, ацетат и сульфат меди) на сокращение выделения CO в продуктах сгорания углей и снижения их недожога в образующемся в золовом остатке.

В качестве исходного образца использовался каменный уголь марки Т шахты «Алардинская» Кемеровской области. Способ подготовки образца угля, методы его анализа, физико-химические характеристики и описание метода модифицирование образца активирующими добавками представлены в работе [5].
В качестве активирующих добавок были использованы: $Cu(NO_3)_2$, $CuSO_4$ и $Cu(CH_3COO)_2$. Массовое количество добавки составляло 5 %.

Исследование процесса горения проводилось с помощью использования экспериментального стенда, включающий в себя камеру сгорания (работающую при атмосферном давлении), автоматическое координирующее устройство, скоростную видеосъемку и поточный газоанализатор. Более подробное описание данной установки и экспериментальной методики приведено в работе [6].

В результате проведения экспериментального исследования было установлено, что использование активирующих добавок солей способствует снижению топливного недожога в минеральном остатке после сжигания образцов. Наблюдаемый факт, вероятнее всего, связан с разветвлением пористой структуры угольных частиц и участием образующегося оксида меди в активации процесса окисления. Максимальное изменение количество топливного недожога было зафиксировано для образца, модифицированного нитратом и ацетатом меди. Определенный факт может быть связан с образованием микровзрывов на ранней стадии горения угля, которые были представлены в нашей предыдущей работе [7].

На рис. 1 представлена зависимость имзенения количественного состава газофазных продуктов (CO и CO_2), образующихся в ходе горения исследуемых образцов углей.

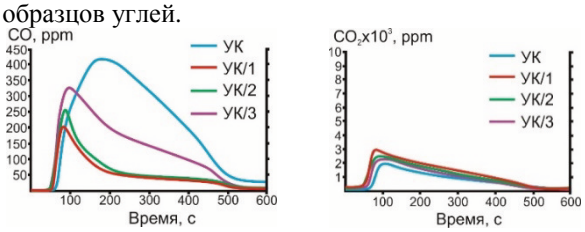


Рис. 1. Профиль концентрации основных компонентов в составе газофазных продуктов (CO и CO_2), образующихся в процессе горения исследуемых образцов углей.

Видно, что использование медносолевых добавок способствует существенному снижению концентрации CO в продуктах реакции. Также наблюдается характерное смещение экстремума на профиле образования CO в более ранний временной период процесса горения. Время достижения концентрационного максимума сокращается почти в два раза. Наибольшее снижение концентрации CO наблюдается в случае использования добавки нитрата меди (более чем в два раза). Увеличение выделение CO_2 для модифицированных образцов связано с интенсификацией окисления CO.

1. Simonov A.D., Fedorov I.A., Dubinin Y.V., Yazykov N.A., Yakovlev V.A., Parmon V.N. Catalytic heat-generating units for industrial heating // Catalysis in Industry. 2013. V.5. №1. P. 42–49.
2. Parmon V.N., Simonov A.D., Sadykov V.A., Tikhov S.F. Catalytic combustion: achievements and problems // Combust Explos Shock Waves. 2015.V. 51. № 2. P. 143–150.
3. Zhang L., Cheng X., Zhang G., Qiu W., He H., Chen G. High active platinum clusters on titanium dioxide supports toward carbon monoxide oxidation // Appl. Catal. B. 2020. V. 266. P. 118629.
4. Zhao G. W., Yu W. Q., Xiao Y. H. Study on brown coal pyrolysis and catalytic pyrolysis // Advanced Materials Research. 2011. V. 236–238. P. 660–663.
5. Larionov K.B., Mishakov I.V., Slyusarskii K.V., Gubin V.E., Vedyagin A.A. Intensification of the oxidation of lignite and coal by an activating additive of Fe(NO3)2 // Solid Fuel Chemistry. 2019. V.53. № 2. P. 262–269.
6. Kuznetsov G.V., Yankovskii S.A. Conditions and characteristics in ignition of composite fuels based on coal with the addition of wood // Steam boilers, power-plant fuels, burner units, and boiler auxiliary equipment. 2019. V. 66. № 2. P. 133–137.
7. Larionov K.B., Mishakov I.V., Slyusarsky K.V. Influence of inorganic salt on the characteristics of oxidation, ignition and combustion of bituminous coal // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1359(1). P. 012058.

Работа поддержана РФФИ (грант № 18-29-24099/18) и грантом Президента РФ (грант № НШ-2513.2020.8)

УДК 54.04

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ОТХОДОВ ПИВОВАРЕННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Ларионов К.Б.[1,2], Калтаев А. Ж.[1], Слюсарский К.В.[1,2]

[1] Томский политехнический университет, Томск
[2] Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва

e-mail: slyuskonst@gmail.com

Пивоваренная промышленность играет ключевую роль при формировании экономических ресурсов многих государств (в т.ч. и России). Согласно [1] производство пивной продукции в Европе составляет 400 млн. гл в год. Наиболее значимая экологическая нагрузка данного промышленного сектора приходится на потребление воды и ее технологический сток, а также образование твердых и других побочных (пивные дрожжи) отходов. К твердым отходам относится влажная гуща (из частиц семян и оболочек зерна) в виде биологического остатка, образующегося после процесса варки и последующего отстаивания ячменного (кукурузного, рисового или овсяного) сырья после выработки сусла. Одним из потенциальных способов утилизации данного вида отхода является его прямое сжигание в топках энергетических котлов. В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования процесса горения отходов пивоваренной промышленности и их физико-химические характеристики.

В качестве исходного образца были использованы производственные отходы Томского пивоваренного завода, предварительно высушенные в естественных условиях до значения влажности, не превышающего 10 мас. %. Далее образец измельчался с помощью автоматически режущего инструмента и фракционировался на ситах с размером ячеек не более 200 мкм. Технические характеристики и элементный состав исследуемого образца определены с помощью стандартных методик [2] и анализатора Euro EA 3000 соответственно. Методическое обеспечение, используемое для проведения исследования процесса горения отходов пивоваренной промышленности более подробно изложено в нашей предыдущей работе [3].

Таблица 1. Технические характеристики и элементный состав исследованных образцов топлива.

Технические характеристики			
W^r, масс.%	A^r, масс.%	V^r, масс.%	Q^{daf}, ккал/кг
6,6	7,2	66,5	4678
Элементный состав, масс.%			
C^{daf}	H^{daf}	N^{daf}	S^{daf}	O^{daf}
51,4	6,1	5,7	0,6	36,1

Влажность, зольность и содержание летучих компонент топлива приведено в пересчете на рабочую массу топлива, элементный состав и низшая теплота сгорания – в пересчете на сухую беззольную массу.

Сопоставляя полученные значения физико-химических характеристик отходов пивоваренной промышленности, было установлено, что их энергетический потенциал, выраженный в параметре низшей теплотворной способности, выше на 30–70%, чем у лесотехнических отходов. При этом в элементном составе исследуемого образца было обнаружено относительно высокое содержание серы, значение которой составило около 0,5 мас.%. Процесс горения топливной навески сопровождался образованием видимого пламени вблизи образца во всем исследованном диапазоне температур (рис. 1).

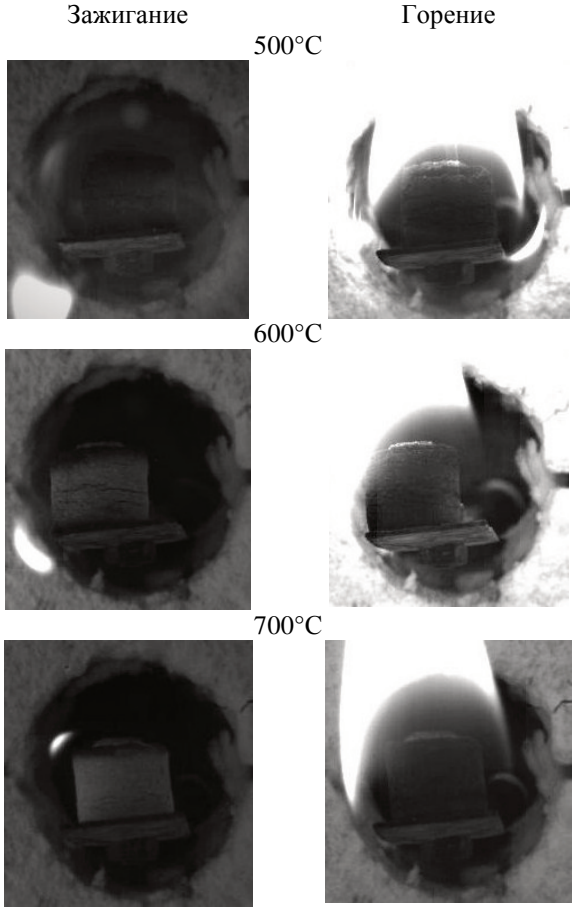


Рис. 1. Характерные кадры моментов зажигания и горения образцов при различных температурах греющей среды.

В составе газофазных продуктов горения на разных этапах термического преобразования образца были зафиксированы следующие соединения: CO, CO_2, SO_2, H_2S и NO_x.

Список литературы

1. The Brewers of Europe: The Contribution made by Beer to the European Economy. In. Region Plan Policy Research and EY (2013).
2. Tabakaev R., Kanipa I., Astafev A., Dubinin Y., Yazykov N., Zavorin A., Yakovlev V. Thermal enhancement of different types of biomass by low temperature pyrolysis. Fuel 2019. V. 245(5). P. 29–38.
3. Larionov K.B., Tsibulskiy S.A., Slyusarskiz K.V., Tolokolnikov A.A., Gubin V.E. Study of the physical-chemical characteristics of non-food solid waste combustion. Journal of Physics: Conference Series 2019. V. 1359(1). P. 012065.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № НШ-2513.2020.8

УДК 533.7

КИНЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НАЧАЛЬНОГО ЭТАПА НЕРАВНОВЕСНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ АРГОНА

Левашов В.Ю.[1], Шишкова И.Н.[2]

[1] Институт Механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
[2] Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва

e-mail: vyl69@mail.ru

Моделирование процессов за фронтом сильных ударных волн неразрывно связано с необходимостью построения кинетических моделей неравновесной ионизации, моделей релаксационных и радиационных процессов, решение задач переноса неравновесного теплового излучения и др.. Корректное описание данных процессов является неотъемлемой частью построения модели неравновесного излучения газов за фронтом ударной волны. Несмотря на то, что излучение газов за фронтом ударной волны исследовались в литературе достаточно подробно, его нельзя считать решенным до конца.

В настоящей работе исследуются процессы в ударно нагретой аргоновой среде. Аргоновая плазма рассматривается в настоящей работе в качестве модельного газа, поскольку отсутствует необходимость учета возбуждения вращательных и колебательных степеней свободы, процессов диссоциации. Данный факт позволяет существенно упростить рассматриваемую задачу.

Хорошо известно, что во фронте сильных ударных волн может иметь место неравновесное заселение возбужденных уровней [1] и, как следствие, необходимо осуществлять расчет кинетики заселения электронных уровней. Существуют различные подходы к расчету распределения населенностей в неравновесной частично ионизованной плазме [2]. В настоящей работе процессы в ударно нагретом аргоне исследуются с использованием метода прямого численного решения системы кинетических уравнений Больцмана [3, 4], адаптированного для исследования процессов в многокомпонентных газовых смесях [5].

На первом этапе рассматривается задача наработки аргона в возбужденном состоянии в результате столкновений атомов аргона в основном (невозбужденном) состоянии. Аргон моделируется как смесь двух газов: аргон в основном состоянии и аргон в возбужденном состоянии. Необходимо отметить, что в этом случае система кинетических уравнений Больцмана будет состоять из двух уравнений и содержит четыре перекрестных интеграла столкновений [6]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_a}{\partial t} + \xi_x \frac{\partial f_a}{\partial x} &= J_{aa} + J_{ab} \\ \frac{\partial f_b}{\partial t} + \xi_x \frac{\partial f_b}{\partial x} &= J_{bb} + J_{ba} \end{aligned} \qquad (1)$$

где J_{ij} – интегралы столкновений, описывающие взаимодействие между молекулами соответствующих сортов; f_i функции распределения молекул по скоростям компонента «*i*», где (*i, j=a, b*). Нижние символы «*a*» и «*b*»относится к аргону в основном и возбужденном состоянии соответственно.

При расчете с использованием системы (1) предполагается: 1) сечения столкновений частиц зависят от скорости; 2) состав смеси может изменяться в процессе взаимодействия (превращение нейтральных атомов в возбужденные и обратно). Получение информации на уровне функций распределения для каждого компонентов смеси позволит детально изучить состояние плазмы в произвольный момент времени.

В работе приведены тестовые расчеты заселения возбужденного состояния аргона на начальном этапе времени за фронтом ударной волны. Результаты вычислений по времени заселения будут сравниваться с экспериментальными данными. Пример экспериментально наблюдаемой эволюции излучения аргона на начальном этапе после прихода ударной волны приведен на рис.1. Результаты получены на экспериментальном комплексе ЭКУД НИИ механики МГУ [7].

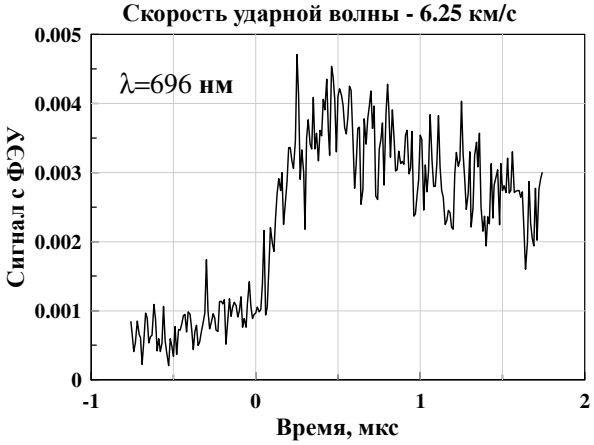


Рис. 1. Пример экспериментально наблюдаемого сигнала с фотоумножителя.

Список литературы

1. Фомин В.М., Постников Б.В., Яковлев В.И. Эффект высокой скорости лавинной ионизации за ударной волной в одноатомном газе // ДАН. 2003. Т. 391. № 5. С. 623– 627
2. Биберман Л.М., Воробьев В.С., Якубов И.Т. Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. М.: Наука. 1982.
3. Аристов В.В., Черемисин Ф.Г. Прямое численное решение кинетического уравнения Больцмана. М.: Вычислительный центр РАН. 1992.
4. Черемисин Ф.Г. Дискретная аппроксимация и примеры решения уравнения Больцмана // Вычислительная динамика разреженного газа. М.: Вычислительный центр РАН. 2000. С. 37–74.
5. Sazhin S.S., Shishkova I.N., Kryukov A.P., Levashov V. Yu. and Heikal M.P. Evaporation of diesel into a background: Kinetic modeling. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2007. No. 50. P. 2675–2691.
6. Коган М.Н. Динамика разреженного газа, М. 1967. С. 440. istina.msu.ru/equipment/card/279166300/

Работа поддержана РФФИ (грант № 20-08-00343)

УДК 662.7

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОНВЕРСИИ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В МНОГОСТАДИЙНОЙ ГАЗИФИКАЦИОННОЙ УСТАНОВКЕ

Левин А.А., Козлов А.Н., Сафаров А.С.

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск

e-mail: lirt@mail.ru

Согласно прогнозу Международного энергетического агентства (Управления энергетической информации США) на 2019 год, глобальное производство электроэнергии с использованием возобновляемых источников энергии увеличится более чем на 20% к 2050 году, обеспечивая половину мирового производства электроэнергии. Основное увеличение в доле выработки электроэнергии будут играть ресурсы солнца, воды и ветра. U.S.E.I. Administration (2019). Однако доля использования ресурсов биомассы также будет возрастать. Так на данный момент рост выработки электроэнергии с использованием биомассы составляет около 1 % [https://www.irena.org/bioenergy]. Биомасса является одним из надежных и доступных возобновляемых источников энергии, которые могут быть использованы для устойчивого производства электроэнергии и тепла. Основные пути роста доли биомассы в электроэнергетике связаны с газификацией биомассы в малых энергосистемах Situmorang Y. A. (2020) and Pradhan P. (2019), в том числе в составе гибридных энергосистем Tiwary A. (2019), Ahmad J. (2018), а также развитием технологий получения биогаза Jena S. P. (2017) и жидкого биотоплива Perkins G. (2018), Priharto N. (2020).

В работе рассматривается задача численного моделирования процессов теплообмена, аэродинамики и кинетики химических реакций в установке переработки низкосортного твердого топлива. Проблема практического использования больших объемов топлива с низкой тепловой эффективностью прямого сжигания, а также высоким содержанием вредных выбросов, является существенным фактором, стимулирующим разработки технологий газификации биомассы. Общим признаком математических моделей, представленных в многочисленных исследованиях можно выделить совместное решение кинетических уравнений описывающих химические трансформации с континуальными уравнениями сохранения массы, энергии и т.д. В качестве успешно применяемого подхода часто выступает описание кинетики химических реакций в виде уравнений типа Аррениуса. Подробное и полное описание протекающих реакций крайне затруднительно в силу большой размерности системы уравнений (пример). На практике обычно применяют редуцирование системы уравнений кинетики химических реакций на основе эмпирических результатов, уменьшая на порядок количество необходимых к рассмотрению реакций. Именно по этой причине скалирование результатов успешно верифицированных моделей на отличающиеся режимные условия (особенно при изменении одного из граничных условий в несколько раз), размеры и мощности технологических установок крайне затруднительно. Таким образом, математические модели описываемого случая выделяются из большого класса задач численного описания сопряженного теплообмена. Перспективы активного внедрения подобных технологий ограничены в настоящий момент в виду накладываемых ограничений, таких как: необходимость достижения высокой степени конверсии энергии; минимизации количества of liquid and solid waste; возможность стабильной работы в условиях значительной вариабельности состава исходного топлива. В нашей работе мы представляем результаты численной и экспериментальной разработки технологии ступенчатой газификации твердого топлива.

Список литературы

1. U.S.E.I. Administration. International Energy Outlook 2019. Energy Information Administration (EIA). 2019.
2. Situmorang, Y. A., Zhao, Z., Yoshida, A., Abudula, A., & Guan, G. 2020. Small-scale biomass gasification systems for power generation (< 200 kW class): A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. V. 117. P. 109486.
3. Pradhan, P., Gadkari, P., Mahajani, S. M., & Arora, A. 2019. A conceptual framework and techno-economic analysis of a pelletization-gasification based bioenergy system. Applied energy. V. 249. P. 1–13.
4. Tiwary, A., Spasova, S., & Williams, I. D. 2019. A community-scale hybrid energy system integrating biomass for localised solid waste and renewable energy solution: Evaluations in UK and Bulgaria. Renewable energy. V. 139. P. 960–967.
5. Ahmad, J., Imran, M., Khalid, A., Iqbal, W., Ashraf, S. R., Adnan, M., ... & Khokhar, K. S. 2018. Techno economic analysis of a wind-photovoltaic-biomass hybrid renewable energy system for rural electrification: A case study of Kallar Kahar. Energy. V148. P. 208–234.
6. Jena, S. P., Mishra, S., Acharya, S. K., & Mishra, S. K. 2017. An experimental approach to produce biogas from semi dried banana leaves. Sustainable Energy Technologies and Assessments. V. 19. P. 173–178.
7. Perkins G., Bhaskar T., Konarova M. Process development status of fast pyrolysis technologies for the manufacture of renewable transport fuels from biomass // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. V. 90. P. 292–315
8. Priharto, N., Ronsse, F., Yildiz, G., Heeres, H. J., Deuss, P. J., & Prins, W. 2020. Fast pyrolysis with fractional condensation of lignin-rich digested stillage from second-generation bioethanol production. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. V. 145. P. 104756.

Работа поддержана РФФИ (грант № 19-58-80016)

УДК 533.17, 532.517.4, 532.574.7, 533.6.08

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ГОРЕНИЯ В МОДЕЛЬНОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГТУ

Лобасов А.С., Дектерев Ар.А., Дулин В.М.

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

e-mail: Alexey.Lobasov@gmail.com

Ужесточение экологических норм на вредные выбросы энергетических установок приводит к необходимости исследования и разработки новых решений, используемых при конструировании малоэмиссионных камер сгорания, работающих с высокой эффективностью. Технология сжигания частично перемешанной смеси со значительным избытком воздуха [1] является одной из стратегий для создания низкоэмиссионных камер сгорания газовых турбин. Однако её реализация на практике осложняется тем, что пламя «бедной» смеси более восприимчиво к термоакустическим колебаниям [2]. Для стабилизации пламени часто используют закрутку потока. Однако для течения с закруткой характерно наличие дополнительной центробежной неустойчивости потока, проявляющейся в случаях, когда интенсивно закрученное течение поступает в камеру сгорания через область внезапного расширения. При достаточно сильной закрутке потока имеет место распад вихревого ядра, как правило, сопряженный с формированием центральной зоны рециркуляции и интенсивной прецессией потока [3]. При этом наличие прецессирующего вихревого ядра в закрученных потоках с горением и его роль в стабилизации пламени попрежнему остаются открытыми вопросами [4].

Целью работы является комплексное исследование динамики турбулентного закрученного пламени в нестационарных условиях горения частично перемешанной смеси со значительным избытком воздуха с использованием современных методов оптической диагностики и верифицированного на основе измерений математического моделирования в модельной камере сгорания ГТУ с закруткой потока.

На горелочном стенде, оснащенным плоскими кварцевыми окнами визирования, проведена серия измерений структуры и динамики потока при горении метана со значительным избытком воздуха, методом анемометрии по изображениям частиц (англ.: particle image velocimetry, PIV) и визуализация гидроксильного радикала (OH), методом плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции (англ.: planar-laser induced fluorescence, PLIF). Метод PIV был применен одновременно с методом PLIF, что было обеспечено генератором TTL сигналов для синхронизации работы лазеров и камер. В экспериментах число Рейнольдса было 25 000. PIV-система состояла из двух ПЗС камер (4 Мпикс изображения, 8 бит) оснащенных оптическими фильтрами и двух сведенных к одной оптической оси импульсных Nd:YAG лазеров (532 нм, импульсы с энергией 70 мДж и длительностью 10 нс). PLIF-система включала в себя перестраиваемый лазер на красителе с накачкой от импульсного лазера Nd:YAG (532 нм, импульсы с энергией 800 мДж и длительностью 7 нс) и ПЗС камеру (1 Мпикс с динамическим диапазоном 16 бит), оснащенной электронно-оптическими преобразователем и усилителем и узкополосным оптическим фильтром (полоса пропускания 300-320 нм).

Численное моделирование горения метана в модельной камере сгорания было проведено с помощью вихреразрешающего подхода LES с моделью подсеточной вязкости WALE. В качестве модели горения использовался подход progress variable совместно с техникой табулирования химических реакций на основе модели Flamelet Generated Manifolds (FGM). Учет лучистого теплообмена между стенками камеры и газовой средой был выполнен с применением модели дискретных ординат и модели серых газов для определения коэффициента поглощения среды.

Как в случае экспериментов, так и в случае математического моделирования полученные базы данных о реализациях поля скорости и концентрации основных компонент газовой смеси и промежуточных соединений химических реакций проанализированы методом главных компонент для выявления когерентных структур в потоке и количественного анализа их влияния на горение в потоке. Установлено, что тепловыделение значительно меняет структуру закрученного потока: горячие продукты горения концентрируются в центральной зоне рециркуляции и снижают уровень пульсаций внутри зоны рециркуляции вследствие локального увеличения вязкости газа с температурой. Эти данные необходимы для верификации результатов численного моделирования. Установлено, что при обеднении смеси, при приближении к бедному срыву происходит увеличение пульсаций давления в камере сгорания. При этом анализ когерентных пульсаций показал наличие двух гидродинамических мод – антисимметричной (первой азимутальной моды), соответствующей прецессии потока, и осесимметричной.

Список литературы

1. Dunn-Rankin D. Lean Combustion: Technology and Control. Academic Press, Elsevier. 2008.
2. Davis D.W., Therkelsen P.L., Littlejohn D., Cheng R.K. Effects of hydrogen on the thermoacoustics coupling mechanisms of low-swirl injector flames in a model gas turbine combustor //Proc. Combust. Inst. 2013. V. 34. P. 3135–3143.
3. Oberleithner K., Sieber M., Nayeri C.N., Paschereit C.O., Petz C., Hege H.-C., Noack B.R., Wygnanski I. Three-dimensional coherent structures in a swirling jet undergoing vortex breakdown: Stability analysis and empirical mode construction. //J. Fluid Mech. 2011. V. 679. P. 383–414.
4. Markovich D.M., Abdurakipov S.S., Chikishev L.M., Dulin V. M., Hanjalic K. Comparative analysis of low- and high-swirl confined flames and jets by proper orthogonal and dynamic mode decompositions // Phys. Fluids. 2014. V. 26. P. 065109.

Работа поддержана РФФИ (грант № 18-08-01183). Численное исследование выполнено в рамках гос. задания ИТ СО РАН (№ АААА-А19-119052190039-8).

УДК 532.517.4: 536.46

РАСЧЕТ ГОРЕНИЯ БЕДНОЙ СМЕСИ В МОДЕЛЬНЫХ КАМЕРАХ СГОРАНИЯ С ЗАКРУТКОЙ ПОТОКА

Майорова А.И., Васильев А.Ю., Соколова Е.И.

Центральный институт авиационного машиностроения им. П.И. Баранова, Москва

e-mail: aimayorova@ciam.ru

В современных камерах сгорания газотурбинных двигателей и стационарных газотурбинных установок широко используются бедные топливовоздушные смеси, позволяющие снизить эмиссию вредных веществ. Стабилизация горения бедной смеси, как правило, происходит в отрывной зоне за счет взаимодействия с закрученным потоком небольшого количества продуктов сгорания богатой смеси. При моделировании таких течений необходимо, поэтому, учитывать анизотропию турбулентных напряжений и изменение скорости горения при закрутке потока. В настоящей работе проведена апробация различных моделей турбулентности при расчете отрывных закрученных течений. Для моделирования горения представлена простая феноменологическая модель, учитывающая влияние закрутки на скорость распространения пламени. Разработанная методика применена к расчету выгорания бедной смеси в модельных камерах сгорания с трехъярусными завихрителями.

В качестве тестовой задачи для апробации моделей турбулентности было выбрано закрученное течение несжимаемой жидкости в круглой трубе с внезапным расширением. Двумерная система стационарных уравнений Рейнольдса решалась конечно-разностным итерационным методом. Численные расчеты проводились как по коммерческим программам с включенными в них моделями турбулентности, так и по авторской программе. В авторской программе использовалась двухпараметрическая модель турбулентности k-ε с простейшим моделированием анизотропии напряжений Рейнольдса: диссипативная часть источникового члена уравнения переноса диссипации энергии турбулентности ε дополнялась слагаемым, зависящим от числа Ричардсона осредненного закрученного течения. Расчетные зависимости длины зоны отрыва за уступом в трубе от параметра закрутки входного потока сравнивались с известными экспериментальными данными. Тестирование показало, что наилучшее совпадение с экспериментом дают простая модель с дополненным уравнением диссипации, а также модели, использующие уравнения переноса напряжений Рейнольдса. Однако, последние требуют в 1.5 -2.5 раза компьютерного времени, чем стандартная k-ε. Поэтому дальнейшие расчеты проводились по авторской программе с применением модифицированной модели k-ε.

Для расчета концентраций реагирующих газов была разработана модель горения, основанная на представлении о поджигании горючей смеси выбросами сгоревшего газа в предположении простой одноступенчатой реакции. При этом считалось, что в закрученном потоке пламя распространяется по быстрейшему из двух механизмов: турбулентного переноса и всплывания пузырей сгоревшего газа в поле центробежной силы.

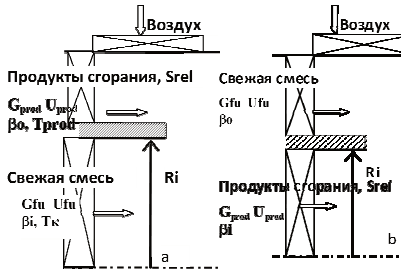


Рис.1 Схемы расчетных областей

Схемы кольцевых модельных камер сгорания приведены на рис.1. Предполагалось, что выше по течению от расчетной области в камеру подается газообразная топливовоздушная смесь. Смесь разделялась на богатую, которая сжигалась во внутренней или наружной трубе и оставшуюся бедную смесь, поступающую во второй канал. Перепад давлений для каналов подачи свежей смеси и продуктов сгорания считался одинаковым. Предполагалось, что на входе в каналы установлены осевые завихрители.

Дополнительно 66% полного расхода воздуха подавалось через кольцевой тангенциальный завихритель. Исследование показало, что при одинаковой относительной площади канала, при подаче продуктов вдоль оси в традиционной схеме с поджиганием изнутри, эта струя холодного воздуха обедняет свежую смесь и одновременно препятствует проникновению в нее горячих продуктов сгорания. В обращенной схеме организации горения, с поджиганием снаружи, струя воздуха, наоборот, усиливает снос горячих продуктов сгорания к оси. При больших углах закрутки этот процесс усиливается "'эффектом Льюиса" (переносом выбросов продуктов сгорания к центру вращения центробежной силой). Поэтому обращенная схема организации горения с поджиганием снаружи оказывается эффективнее схемы с поджиганием изнутри. Далее в расчетах варьировалась взаимная закрутка потоков за осевыми завихрителями и рассматривалось ее влияние на скорость выгорания бедной смеси. Установлено, что при подаче горячих продуктов сгорания в наружный канал полнота сгорания сильно зависит от разности углов закрутки потока осевыми завихрителями и наибольшего значения достигает при противокрутке. При подаче продуктов сгорания вдоль оси камеры полнота сгорания слабо зависит от разности углов закрутки потока осевыми завихрителями и определяется в основном струей «холодного» воздуха, идущего через тангенциальный завихритель.

УДК 621.9

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О РАСПРОСТРАНЕНИИ ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ ПО ГАЗОВЗВЕСИ ДРЕВЕСНОЙ ПЫЛИ

Моисеева К.М., Крайнов А.Ю., Рожкова Е.И.

Томский государственный университет

e-mail: Moiseeva_KM@t-sk.ru

В докладе представлены результаты решения задачи о распространении волны горения по газовзвеси древесной пыли. Ранее в работе [1] было выполнено исследование скорости распространения пламени по неподвижной газовзвеси древесной пыли на плоскости с учетом неравномерного распределения пыли. Определено, что скорость горения смеси с мелкодисперсными частицами или с большим количеством летучих компонентов в частицах горит с более высокой скоростью, чем крупнодисперсная аэровзвесь древесной пыли, содержащая малое количество летучих компонентов. Основным приближением работы [1] являлось то, что газовзвесь неподвижна. Перемещение газовзвеси существенно изменяет скорость распространения пламени. В связи с этим возник вопрос численного моделирования горения газовзвеси древесной пыли в условиях переменного давления газа и движения газовзвеси под действием теплового расширения. За основу физико-математической модели взята работа [2].

Целью настоящего доклада является определение влияния состава древесной пыли на скорость распространения фронта горения в аэровзвеси древесной пыли.

Полагается, что полидисперсная взвесь древесной пыли равномерным образом распределена в канале. Постановка задачи учитывает сушку древесной пыли, выделение летучих компонентов, горение частиц и горение летучих компонентов, диффузию и теплопроводность в газе. Полагается, что процесс воспламенения и горения древесной пыли состоит из стадии нагрева частиц, стадии выделения летучих компонентов, стадии параллельного горения летучих компонентов в газе и коксового остатка частиц. Гомогенные химические реакции выделения и горения летучих компонентов описываются по закону Аррениуса. Гетерогенная реакция горения коксового остатка описывается с учетом массоотдачи. Для заданных допущений постановка задачи имеет вид:

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t}+\frac{\partial \rho_g u_g}{\partial x}=\sum_{i=1,Nf}\left(G_{1,i}+G_{2,i}\right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_g u_g}{\partial t}+\frac{\partial\left(\rho_g u_g^2+p_g\right)}{\partial x}=\sum_{i=1,Nf}\left[\left(G_{1,i}+G_{2,i}\right)u_{p,i}-\tau_{tr,i}\right], \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_g\left(\varepsilon_g+0.5u_g^2\right)}{\partial t}+\frac{\partial\left[\rho_g u_g\left(\varepsilon_g+0.5u_g^2\right)+pu_g\right]}{\partial x}=$$
$$=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_g\frac{\partial T_g}{\partial x}\right)+\left(Q_3G_3+Q_4G_4\right)-\sum_{i=1,Nf}u_{p,i}\tau_{tr,i}+$$
$$+\sum_{i=1,Nf}\alpha_{p,i}\,n_{p,i}S_{p,i}\left(T_{p,i}-T_g\right)+ \quad (3)$$
$$+\sum_{i=1,Nf}\left(G_{1,i}+G_{2,i}\right)\left(0.5u_{p,i}^2+c_pT_{p,i}\right),$$

$$\frac{\partial \rho_{ox}}{\partial t}+\frac{\partial \rho_{ox}u_g}{\partial x}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\rho_g D_g\frac{\partial a_{ox}}{\partial x}\right)-\alpha_2\sum_{i=1,Nf}G_{2,i}- \quad (4)$$
$$-\alpha_3G_3-\alpha_4G_4,$$

$$\frac{\partial \rho_{gl}}{\partial t}+\frac{\partial \rho_{gl}u_g}{\partial x}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\rho_g D_g\frac{\partial a_{gl}}{\partial x}\right)-G_3+\sum_{i=1,Nf}G_{1,i}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t}+\frac{\partial \rho_f u_g}{\partial x}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\rho_g D_g\frac{\partial a_f}{\partial x}\right)-G_4, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho_{pl,i}}{\partial t}+\frac{\partial \rho_{pl,i}u_{p,i}}{\partial x}=-G_{1,i}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial \rho_{p,i}}{\partial t}+\frac{\partial \rho_{p,i}u_{p,i}}{\partial x}=-\left(G_{1,i}+G_{2,i}+G_{ev}\right), \quad (8)$$

$$\frac{\partial\left(\rho_{p,i}u_{p,i}\right)}{\partial t}+\frac{\partial \rho_{p,i}u_{p,i}^2}{\partial x}=\left(\tau_{tr,i}-\left(G_{1,i}+G_{2,i}\right)u_{p,i}\right), \quad (9)$$

$$\frac{\partial \rho_{p,i}\left(\varepsilon_{p,i}+0.5u_{p,i}^2\right)}{\partial t}+\frac{\partial \rho_{p,i}u_{p,i}\left(\varepsilon_{p,i}+0.5u_{p,i}^2\right)}{\partial x}=$$
$$=Q_2G_{2,i}-Q_1G_{1,i}-\alpha_{p,i}S_{p,i}n_{p,i}\left(T_{p,i}-T_g\right)-G_{izl}+ \quad (10)$$
$$+\tau_{tr,i}u_{p,i}-\left(G_{1,i}+G_{2,i}\right)\left(c_pT_{p,i}+0.5u_{p,i}^2\right)-LG_{ev},$$

$$\frac{\partial n_{p,i}}{\partial t}+\frac{\partial n_{p,i}u_{p,i}}{\partial x}=0, \quad (11)$$

$$p_g=\rho_gR_gT_g. \quad (12)$$

Граничные и начальные условия, а также метод решения соответствовали работе [2]. Кинетические параметры реакций выделения летучих и горения коксового остатка были взяты из диссертационной работы [3]. Кинетические константы скорости горения летучих компонентов соответствовали работе [2].

В параметрическом исследовании варьировались размер и массовая концентрация частиц, содержание летучих компонентов в частицах. Из серии параметрических расчетов определялась скорость распространения пламени по газовзвеси в зависимости от ее состава.

Список литературы

1. Moiseeva K.M., Krainov A.Yu., Chentsova S.K. Flame propagation features in still wood dust suspension in the air // J. Phys. Conf. Ser. 2019. V. 1404. P. 012088.
2. Moiseeva K.M., Krainov A.Yu. The burning rate of coal-dust-air suspension// J. Phys. Conf. Ser. 2019. V. 1261. P. 012023
3. Голубев В.А. Обоснование и совершенствование способов энергетического использования растительных отходов [Текст]: дис. ... канд. техн. наук : 01.04.14, 05.14.14 / В.А. Голубев. Барнаул. 2014. 160 с.

Работа поддержана РФФИ (грант № 19-48-703006 р_мол_а)

УДК 629.7.036

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В КОЛЬЦЕВОЙ ДЕТОНАЦИОННОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ МАЛОГО ДИАМЕТРА

Сидоров Р.С.

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Москва

e-mail: rodik@myrambler.ru

Горение в непрерывно вращающихся детонационных волнах – один из возможных способов организации рабочего процесса в двигателях перспективных высокоскоростных летательных аппаратов. При этом такие камеры сгорания имеют ограничение – минимальный диаметр, при котором может осуществляться режим непрерывного детонационного горения. Так, в работе [1] говорится, что при использовании воздуха в качестве окислителя диаметр КС, равный 100 мм, оказался недостаточным, и детонационное сжигание смесей удалось осуществить в КС диаметром 306 мм. В [2] также показано, что двумерная модель ДНВД с предварительно перемешанной топливо-воздушной смесью и граничными условиями, описанными в [3] не позволяет оценить влияние физических размеров КС на существование детонации.

В данной работе с помощью трёхмерного численного моделирования показано, что режим горения водородо-воздушной смеси может осуществляться в непрерывно вращающейся детонационной волне в кольцевой камере сгорания диаметром 78 мм (рис. 1, 2). Выбрана геометрия камеры и режимы её работы, а также исследовано влияние давления в ресивере. При давлении в ресивере 32 бар плотность тока в критическом сечении аэродинамического сопла составила 7349.2 кг/см^2.

Показано, что во вращающейся системе отсчёта, в которой детонационная волна покоится, линии тока приходят к фронту волны практически под прямым углом, что позволило сделать простые оценки параметров свежей смеси перед ней. Сравнение с параметрами детонации в предварительно перемешанной смеси в трубе показало, что скорость распространения детонационной волны в камере составляет 0.65–0.74 от скорости детонации Чепмена-Жуге, а её высота приблизительно равна характерному размеру ячеистой структуры детонации.

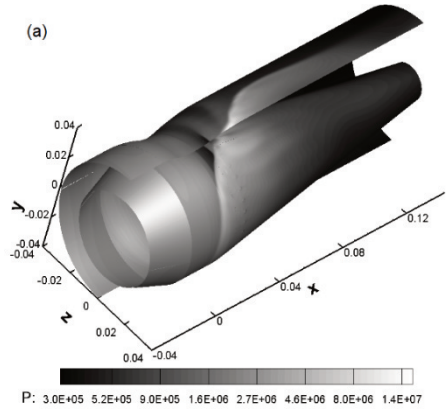


Рис. 1. Поле статического давления на внешней стенке и центральном теле. Давление в ресивере 32 бар.

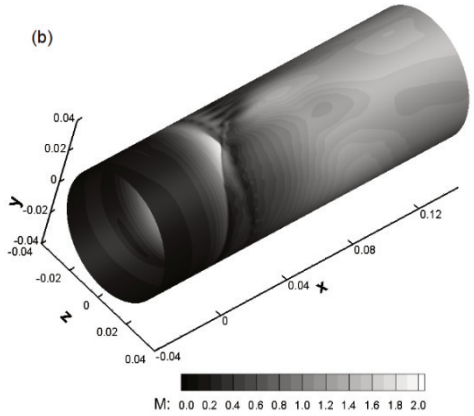


Рис. 2. Поле чисел Маха на цилиндрической поверхности. Давление в ресивере 32 бар.

Список литературы

1. Быковский Ф.А., Ждан С.А., Ведерников Е.Ф. 2006. Непрерывная спиновая детонация топливно-воздушных смесей Физика горения и взрыва. Т. 42. С. 107–115.
2. Babushenko D.I., Kopchenov V.I. Influence of combustion chamber size on the existence of rotating detonation wave: modeling study // Nonequilibrium processes in physics and chemistry Edited by A. M. Starik and S. M. Frolov. Moscow. 2016. С. 309–318.
3. Ждан С А, Быковский Ф А, Ведерников Е Ф 2007 Математическое моделирование вращающейся волны детонации в водородно-кислородной смеси Физика горения и взрыва. Т. 43. С. 90–100.

УДК 54.04

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДАВЛЕНИЯ НА ПИРОЛИЗ ОПИЛОК И РЕЗИНЫ В СРЕДЕ АРГОНА И ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

Слюсарский К.В., Кадчик Д.Ю., Асильбеков А.К.

Томский политехнический университет

e-mail: slyuskonst@gmail.com

Пиролиз – процесс конверсии органического топлива при нагреве в инертной среде [1], который широко используется в ряде технологий глубокой переработки топлив, таких как производство жидких топлив [2], сорбентов [3] и др. При этом ряд стадий горения и газификации в определенных условиях протекают в условиях недостатка кислорода, т.е. закономерности пиролиза могут быть использованы и для описания данных процессов. В последнее время, все больший и больший интерес привлекают технологии конверсии топлива в условиях избыточного давления. Несмотря на то, что давление оказывает значительный эффект на различные аспекты процесса пиролиза, такие как соотношение между жидкими и газообразными продуктами [4, 5], их составом [5,6] и свойствами [5], скорость и температурный коэффициент реакций [4, 6] и др., исследование влияния давления на закономерности подобных процессов в литературе представлено преимущественно применительно к углям различного вида. Число работ, посвященных исследованию пиролиза отходов различного происхождения, крайне ограничено. В данной работе представлены результаты исследования процессов конверсии образцов древесных опилок и резинотехнических отходов в среде аргона и диоксида углерода при кондуктивном нагреве в диапазоне давлений от 1 до 5 ата.

Исследуемые образцы древесных опилок для измерений измельчались и просеивались для получения фракции менее 80 мкм, а потом пеллетировались в цилиндры диаметром 6 мм и высотой ~5 мм. Образцы резины вырезались в кубы с размером ребра 6 мм.

Технический состав исследованных топлив и теплота их сгорания определялись с применением стандартных методик согласно ГОСТ. Элементный состав образцов определялся с помощью CHNS-анализатора EuroVector EA 3000. Результаты анализа приведены в таблице 1.

Таблица 1. Технический и элементный состав образцов исследованных топлив.

Образец	Технические характеристики			
	A^d, %	W^a, %	V^{daf}, %	Q, МДж/кг
Опилки	8.62	3.80	82.33	27.97
Резина	21.70	0.40	38.97	18.38
Образец	Элементный состав, масс. %				
	C^d	H^d	N^d	S^d	O^d
Опилки	48.46	5.90	3.65	0.00	33.37
Резина	65.36	6.39	0.91	1.68	3.96

Исследование процесса пиролиза проводилось в модернизированной бомбе постоянного давления (т.н. бомбе Виелля). Внешний вид установки представлен на рис. 1. Нагрев топлива производился с помощью нити накаливания, подключенной к источнику постоянного тока, с скоростью до 20°C/с от комнатной температуры до 400°C. Давление в бомбе задавалось и поддерживалось за счет постоянной продувки объема бомбы соответствующим газом. Давление в бомбе задавалось с помощью редукторов на выходе из газового баллона и на выходе из бомбы.



Рис. 1. Внешний вид экспериментальной установки.

В данной работе в качестве газа применялись аргон (в качестве инертного газа) и диоксид углерода (в качестве слабо реакционного газа). Перед началом нагрева, для удаления остаточного воздуха из объема камеры, она продувалась газом в течение 10 минут. Проводились измерения массы образца при нагреве в течение 1, 2, 4, 6, 8, 10 и 12 минут. Для полученного в результате пиролиза твердофазный остаток определялись содержание летучих веществ, золы и фиксированного углерода. В результате экспериментальных исследований были определены закономерности убыли массы на различных стадиях процесса пиролиза в среде аргона и диоксида углерода в зависимости от давления. Также были определены зависимости доли выхода твердой фракции и её характеристик.

Список литературы

1. Ranzi E., Faravelli T., Manenti F., Pyrolysis, Gasification, and Combustion of Solid Fuels // Adv. Mar. Biol. 2016. V. 35. P. 1–94.
2. Xu B., Lu W., Sun Z., He T., Goroncy A., Zhang Y., Fan M., High-quality oil and gas from pyrolysis of Powder River Basin coal catalyzed by an environmentally-friendly, inexpensive composite iron-sodium catalysts // Fuel Process. Technol. 2017. V. 167. P. 334–344.
3. Gao L., Goldfarb J.L., Solid waste to biofuels and heterogeneous sorbents via pyrolysis of wheat straw in the presence of fly ash as an in situ catalyst // J. Anal. Appl. Pyrolysis. 2019. V. 137. P. 96–105.
4. Cetin E., Moghtaderi B., Gupta R., Wall T.F., Biomass gasification kinetics: influences of pressure and char structure // Combust. Sci. Technol. 2005. V. 177. P. 765–791.
5. Xu B., Li A., Effect of high-pressure on pine sawdust pyrolysis: Products distribution and characteristics // AIP Conf. Proc. 2017. V. 1864.
6. Valin S., Ravel S., Guillaudeau J., Thiery S., Comprehensive study of the influence of total pressure on products yields in fluidized bed gasification of wood sawdust // Fuel Process. Technol. 2010. V. 91. P. 1222–1228.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № НШ-2513.2020.8

УДК 54.04

ИССЛЕДОВАНИЕ ПИРОЛИЗА УГЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ МАРОК В СРЕДЕ АРГОНА, ДИОКСИДА УГЛЕРОДА И ВОДЯНОГО ПАРА

Слюсарский К.В.[1,2], Кадчик Д.Ю.[1], Асильбеков А.К.[1]

[1] Томский политехнический университет, Томск
[2] НИТУ «МИСИС», Москва

e-mail: slyuskonst@gmail.com

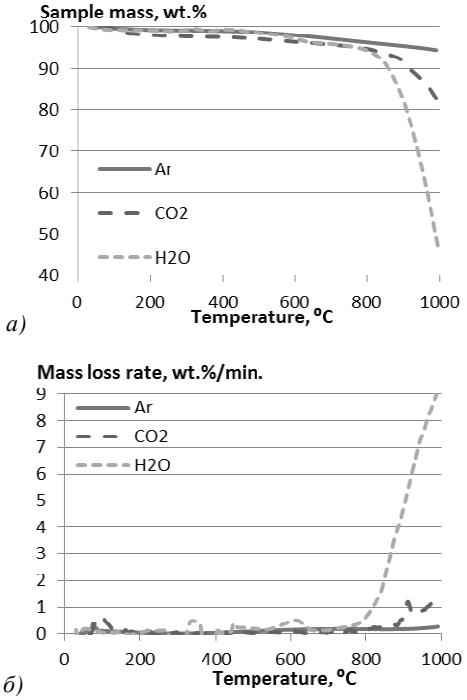
Пиролиз – процесс термического разложения топлива в условиях недостатка кислорода – широко используется в технологиях глубокой переработки угля [1]. Наиболее широко распространен процесс пиролиза в среде азота или инертных газов. Однако сложность нагрева указанных газов до достаточных температур и результирующая аллотермичность процесса привела к более широкому распространению технологий конверсии топлива в условиях подачи дуться с коэффициентом избытка воздуха меньше 1 [1]. В таком случае, часть углерода топлива сгорает, обеспечивая достаточную теплоту процесса, позволяя перевести его в автотермический режим. Однако полученные в таком случае продукты сгорания состоят, преимущественно, из диоксида углерода и водяного пара, способных вступать в химические реакции с углеродом. Чрезмерное повышение температуры, в таком случае, может привести к чрезмерному выгоранию твердой части топлива. В данной работе посредством термического анализа была произведена сравнительная оценка параметров конверсии образцов углей трех различных марок в среде инертного аргона, диоксида углерода и водяного пара.

Исследуемые образцы антрацита, каменного и бурого углей для измерений измельчались и просеивались для получения фракции менее 80 мкм. Технический состав исследованных топлив и теплота их сгорания определялись с применением стандартных методик согласно ГОСТ. Элементный состав образцов определялся с помощью CHNS-анализатора EuroVector EA 3000. Результаты анализа приведены в таблице 1. Технический состав приведен в пересчете на рабочую массу топлива, а элементный – на сухую беззольную.

Таблица 1 – Технический и элементный состав.

Образец	Технические характеристики			
	A, %	W, %	V, %	FC, %
Антрацит	<1	10	<1	90
Каменный	3	21	20	66
Бурый	7	16	32	45
Образец	Элементный состав, масс. %			
	H	C	N	O
Антрацит	2	95	<1	<1
Каменный	4	68	3	4
Бурый	4	50	2	28

Термический анализ проводился с использованием анализатора STA 449 F3 Jupiter (Netzsch, Germany). Измерения проводились со скоростью нагрева 20°C/мин и расходом среды 150 мл/мин в температурном диапазоне 20–1000°C. Перед каждым измерением камера анализатора продувалась исследованным газом для вытеснения остаточного воздуха в течении 30 минут. Для измерений в среде водяного пара нагрев до 120°C производился в среде аргона, а потом осуществлялась подача водяного пара.



а)

б)

Рис. 1. Экспериментальные ТГ (а) и ДТГ-кривые (б) для образца антрацита.

В результате анализа полученных данных было установлено, что температурные диапазоны убыли массы в среде водяного пара и диоксида углерода примерно одинаковы. В то же время, скорость убыли массы в среде диоксида углерода намного ниже, чем в водяном паре. Данный результат коррелирует с представленными ранее в литературе данными: во многих работах указывается, что энергия активация данных реакций примерно одинакова, а предэкспонент для диоксида углерода существенно меньше [2].

Установлено, что максимальные температуры, при которых разница между массой образца в среде аргона и водяного пара менее 2 масс. %, определены для антрацита, а минимальные – для каменного угля.

Список литературы

1. Логинов Д.А., Исламов С.Р., Степанов С.Г, Кочетков В.Н., Получение сорбента из низкозольного бурого угля //Химия твердого топлива. 2016. № 2. С. 46–50.
2. Козлов А.В., Теренченко А.С., Ливанский А.Н., Разработка математической модели реактора получения синтез-газа из отходов лесной промышленности // Техносферная безопасность. 2011 Т. 29. №2. С. 105–110.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № НШ-2513.2020.8

УДК 536.46:662.61

ВЛИЯНИЕ БОРА, МАГНИЯ И МЕДИ НА ЗАЖИГАНИЕ ВЭМ, СОДЕРЖАЩЕГО АЛЮМИНИЙ

Сорокин И.В.[1], Коротких А.Г.[1,2], Селихова Е.А.[1]

[1] Национальный исследовательский Томский политехнический университет
[2] Национальный исследовательский Томский государственный университет

e-mail: ivans3485@gmail.com

Металлические горючие существенно модифицируют основные характеристики зажигания и горения гибридных и смесевых твердых топлив СТТ. Алюминий является основным компонентом в высокоэнергетических материалах (ВЭМ) за счет его энергоэффективности и дешевизны [1]. Тем не менее, используемые порошки алюминия в составах ВЭМ в качестве горючего имеют недостаток, связанный с присутствием оксидного слоя Al_2O_3 на поверхности частиц, который препятствует доступу газообразного окислителя и увеличивает время зажигания и горения металлических частиц и составов ВЭМ [1, 2]. В настоящее время ведется поиск различных добавок металлов и неметаллов, которые могут выступать в качестве модификатора горения составов ВЭМ или добавки, улучшающей полноту сгорания металла. Исследуются добавки различных порошков металлов и сплавов на основе Al, Fe, Cu, Mg, Ti, Zr, Mg, B и др. в составы ВЭМ, имеющих различную дисперсность и содержание [1, 3–4].

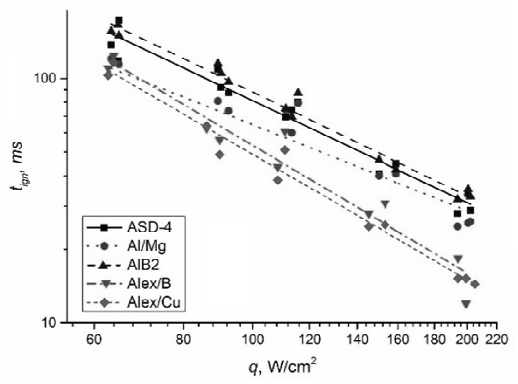


Рис. 1. Время задержки зажигания в зависимости от плотности теплового потока составов ВЭМ: АСД-4 – $t_{ign} = 48169 \cdot q^{-1.387}$; Al/Mg – $t_{ign} = 36218 \cdot q^{-1.354}$; AlB_2 – $t_{ign} = 58512 \cdot q^{-1.412}$; Alex/B – $t_{ign} = 154669 \cdot q^{-1.732}$; Alex/Cu – $t_{ign} = 124532 \cdot q^{-1.703}$.

В данной работе представлены экспериментальные данные зажигания состава ВЭМ на основе перхлората аммония (ПХА) и бутадиенового каучука, содержащего порошки алюминия, механосмесей Al/B и Al/Cu, Al/Mg сплава и диборида алюминия AlB_2. Зажигание цилиндрических образцов ВЭМ диаметром 1 см осуществляли лучистым потоком тепла с использованием непрерывного CO_2-лазера РЛС-200 с длиной волны излучения 10.6 мкм и максимальной мощностью 200 Вт. В опытах определяли времена задержки зажигания t_{ign} ВЭМ по моменту времени появления пламени вблизи поверхности ВЭМ в зависимости от плотности теплового потока.

Полученные результаты измерения времени задержки зажигания ВЭМ в зависимости от плотности теплового потока представлены в виде точек на рис. 1.

Результаты проведенного исследования показали, что использование металлических горючих Al/B, Al/Mg, и Al/Cu в составе ВЭМ снижает время задержки зажигания t_{ign} образцов в диапазоне плотности теплового потока q = 60–220 Вт/см^2 по сравнению с t_{ign} состава ВЭМ, содержащего порошок Al. Наименьшие значения времени задержки зажигания зафиксированы для состава ВЭМ, содержащего механосмеси Al/B и Al/Cu, при этом времена задержки зажигания снижались на 30–50 % по сравнению с Al-содержащим ВЭМ в зависимости от q. Применение Al/Mg сплава в составе ВЭМ снижает время задержки зажигания в 1.11–1.15 раза по сравнению с ВЭМ, содержащим Al. При замене алюминия на порошок AlB_2 в составе ВЭМ время задержки зажигания образца увеличилось на 7–10% в зависимости от плотности теплового потока.

Список литературы

1. Гусейнов Ш.Л. Нанопорошки алюминия, бора, боридов алюминия и кремния в высокоэнергетических материалах // Ш.Л.Гусейнов, С.Г.Федоров. М.: Торус Пресс, 2015. 255 с.
2. Gorbenko T.I., Gorbenko M.V., Orlova M.P., Volkov S.A. The study of the effect of aluminum powders dispersion on the oxidation and kinetic characteristics // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 919, No. 1. P. 1–6.
3. Umbrajkar S.M., Schoenitz M., Dreizin E.L. Exothermic reactions in Al-CuO nanocomposites // Thermochim. Acta. 2006. V. 451. P. 34–43.
4. Abdellahi M., Jabbarzare S., Ghayour H., Khandan A. Thermal and X-ray analyses of aluminum–titanium nanocomposite powder // J. Therm. Anal. Calorim. 2018. V. 131. P. 853–863.
5. Korotkikh A.G., Sorokin I.V., Selikhova E.A., Arkhipov V.A. Effect of boron and aluminum diboride on ignition of high-energy materials // Sci. Tech. Energetic Materials. 2019. V. 80. No. 5. P. 189–193.

Работа поддержана РФФИ (грант № 19-33-90015)

УДК 534.222 + 536.46

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕТОНАЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЙ В СВЕРХЗВУКОВОЙ КАМЕРЕ

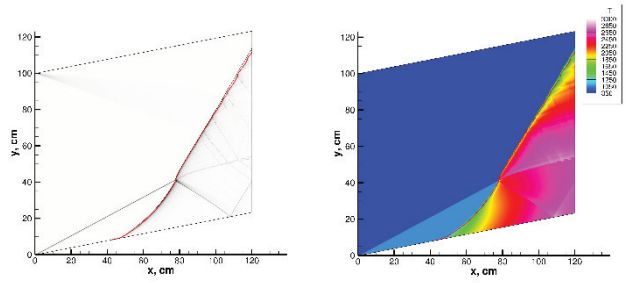
Троцюк А.В.

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

e-mail: trotsyuk@hydro.nsc.ru

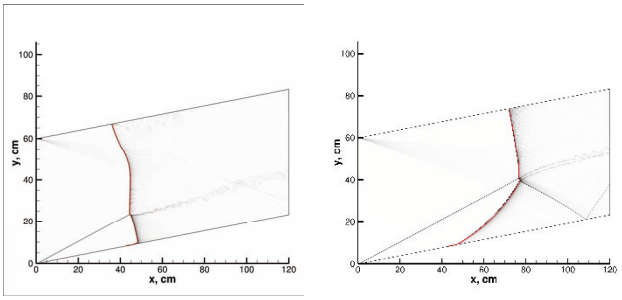
Представленная работа посвящена исследованию детонационных структур в прямоточной сверхзвуковой камере новой конструкции, предложенной нами в [1,2]. Детонационная камера (ДК) представляет собой кольцевой цилиндрический канал, расположенный между внутренней и внешней цилиндрическими стенками. Внутри канала помещена тонкая сплошная однозаходная спираль с постоянным углом α относительно оси камеры. На входе мы имеем сверхзвуковой поток однородно перемешанной стехиометрической водородно-воздушной смеси с числом Маха M_0 выше, чем число Маха M_{CJ} детонационной волны (ДВ) в режиме Чепмена-Жуге (CJ). В наших исследованиях поток имел статическое давлением p_0=0.166 атм и статическую температуру T_0=850 K. Для этих условий M_{CJ}=2,73.

В работах [1, 2] было проведено численное моделирование детонационных течений в канале ДК при M_0=3 и M_0=5 и $\alpha > \alpha_{CJ}$. Исследования показали, что при некоторых геометрических параметрах ДК, имеет место эффект бифуркации стационарной структуры течения с наклонной ДВ по начальному условию старта ДК.



(а) *(б)*

Рис. 1. Структура течение в ДК: (а) численный шлирен, (б) поле температуры (К).



(а) *(б)*

Рис.2. Структура течение в ДК, численный шлирен: (а) УВ старт, (б) ВР старт.

В представленной работе были проведены численные исследования детонационных структур в описанной ДК при M_0=3 для α=11° < α_{CJ}. На рис. 1 представлены картины течения в ДК при L=120 см, H=100 см. Показано финальное стационарное поле течение. Мы имеем классическую λ–структуру течения, состоящую из головной нереагирующей наклонной ударной волны (УВ) и пересжатой наклонной ДВ, исходящей из тройной точки при x≈75 см. Красная сплошная линия показывает границу окончания зоны индукции и начало зоны тепловыделения. Исследования показали, что при H=80см, 90 см, 100 см, 120 см для L=120 см λ–конфигурация не меняет свою структуру и координаты тройной точки остаются неизменными. При H=80см и 90 см имеется отражение наклонной ДВ от верхней границы, что также не влияет на положение тройной точки λ–конфигурации.

Было показано, что при указанных L и H на финальную установившуюся структуру течения также не влияют условия старта работы ДК. Как было показано в [1,2],имеются два предельно различных условия старта. Старт (t=0) с однородного потока смеси с массовой скоростью $\mathbf{u}=(M_0 \cdot c_0, 0)$ в канале ДК. Обозначим его как ВР старт, т.к. при этом со временем формируется волна разрежения (ВР) в верхней части потока. Старт с неподвижной смеси $\mathbf{u}$=(0,0) внутри области решения приводит к формированию нормальной УВ на входе x=0 в ДК, которая затем идет вниз по потоку. Обозначим это как УВ старт.

При уменьшении H эффект бифуркации был получен и при $\alpha < \alpha_{CJ}$. На рис.2 показаны стационарные структуры течения для канала с L=120 см, H=60 см. На рис. 2а представлена финальная конфигурация при УВ старте, на рис. 2б – при ВР старте. В первом случае возникшая при x≈0 почти нормальная ДВ отступает вниз по потоку и останавливается примерно в конце зоны индукции за головной наклонной УВ при y=0. Во втором случае, сформировавшаяся при отражении потока от наветренной поверхности спирали ДВ идет вперед, против потока, и останавливается в устойчивом положении в окрестности тройной точки λ–конфигурации, см рис.1. Таким образом, при одних и тех же граничных условиях, но различных начальных условиях, мы имеем различные детонационные структуры в канале ДК.

Работа выполнена с использованием вычислительных ресурсов Межведомственного суперкомпьютерного центра Российской академии наук (МСЦ РАН, Москва).

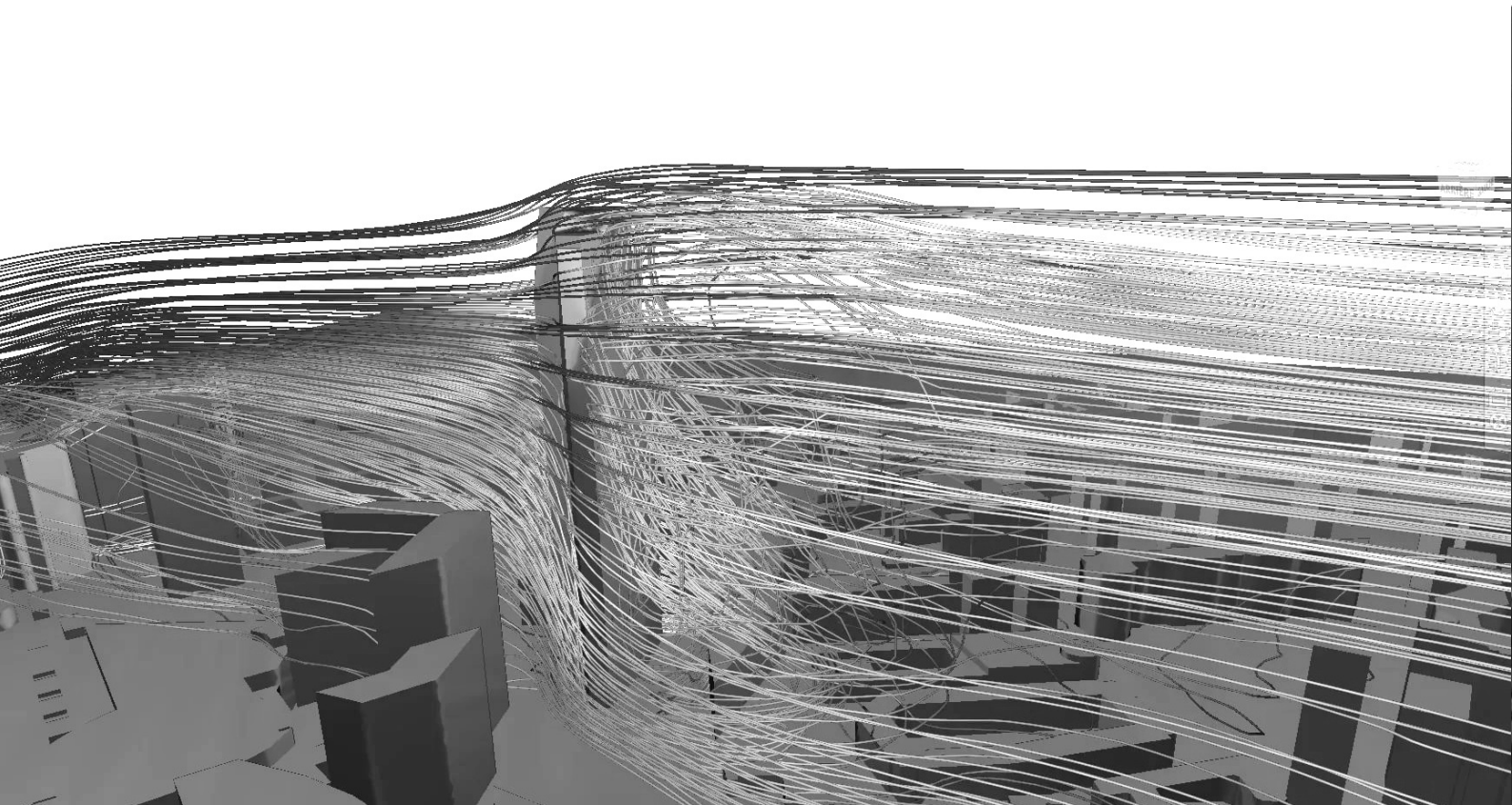
Список литературы

1. Trotsyuk A.V. Numerical investigation of flow structures with an oblique detonation wave in a hypersonic annular cylindrical chamber // Journal of Physics: Conference Series. 2017. V. 899. No. 04. P. 042010. doi:10.1088/1742-6596/899/4/042010.
2. Trotsyuk A.V. Numerical modelling of detonation combustion of hydrogen-air mixture in a supersonic annular chamber // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1128. P. 012078. DOI: 10.1088/1742-6596/1128/1/012078.

Работа поддержана РФФИ (грант № 17-03-01351)



СЕКЦИЯ 5
Численные методы в теплофизике и физической гидрогазодинамике



УДК 532.542.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ LES ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА В ТРУБЕ В СОПРЯЖЕННОЙ СО СТЕНКОЙ ПОСТАНОВКЕ

Артемов В.И., Макаров М.В., Минко К.Б., Яньков Г.Г.

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

e-mail: makarovmv2000@yandex.ru

В настоящей работе с помощью гибридного метода моделирования больших вихрей (RANS/LES) исследуются температурные пульсации в жидкости и стенке трубы в сопряженной постановке. Расчеты турбулентного течения выполнены для воды, воздуха и ртути с использованием реализованной в авторском CFD коде ANES [1] «сопряженной» модели LES. Кроме того предложена приближенная модель стенки, которая может использоваться в качестве граничного условия при расчетах методом DNS и LES в несопряженной постановке.

Методология В данной работе основное внимание уделено верификации «сопряженной» версии гибридного метода KDES [2] и моделированию пульсаций температуры в пристеночной области и стенке при турбулентном течении различных теплоносителей. Была также разработана приближенная «0D» модель стенки, позволяющая заменить заданную плотность теплового потока на внешней поверхности стенки или заданное объемное тепловыделение нестационарными граничными условиями в следующем безразмерном виде

$$-\frac{1}{Pe}\frac{\partial T}{\partial n}=\alpha_S\left(T_S-T_{fP}\right),$$
$$T_S=T_S^0\exp\left(-B\Delta\tau\right)+A/B\left[1-\exp\left(-B\Delta\tau\right)\right], \quad (1)$$

где Pe – число Пекле, T_{fP} – температура жидкости в центре (точке P) приграничной со стенкой ячейки, а T_S, T_S^0 – температуры стенки на текущем и предыдущем шаге по времени. Величины α_s, A и B могут быть определены по заданной плотности теплового потока на внешней поверхности стенки, толщине и свойствам стенки, а также свойствам жидкости и расстоянию от точки P до стенки.

Результаты расчетов Расчеты выполнены с использованием неструктурных сеток и схем второго порядка точности по времени и пространству. По толщине стенки расчетная сетка имела до 10 контрольных объемов. Далее расчеты, выполненные без учета стенки, имеют обозначения «NoWq», данные по приближенной модели стенки – «W0D», результаты корректного расчета стенки при заданной плотности теплового потока на внешней поверхности стенки обозначены «Wq_w», при заданном объемном тепловыделении – «Wq_v».

На рис.1 представлены расчетные данные для воды при течении в круглой трубе (Pr=6,2, Re=7500). Результаты сравниваются с экспериментальными данными работы [3]. Число ячеек составило 1,85 млн. для варианта без стенки и 2,58 млн. для вариантов с твердой стенкой. Стенка трубы в экспериментах [3] толщиной 0,49 мм была выполнена из стали и относится к категории «тонкой» и «слаботеплопроводной».

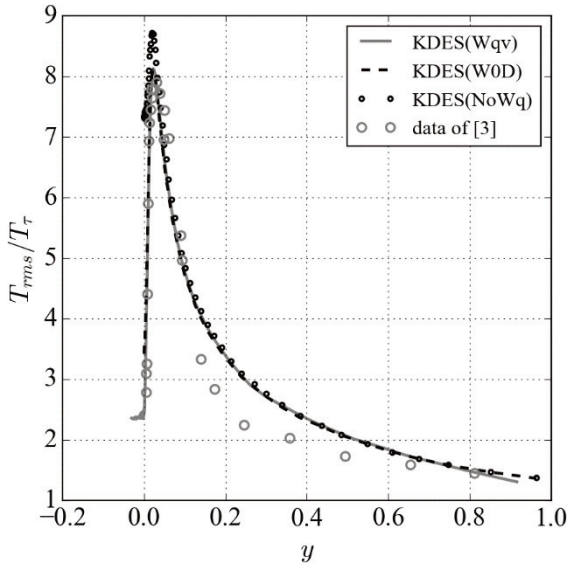


Рис.1 Сравнение интенсивности пульсации безразмерной температуры с данными [3].

Результаты расчетов для ртути, воздуха и воды обеспечивают хорошее воспроизведение имеющихся данных о колебаниях температуры вблизи стенки трубы, и они правильно отражают влияние безразмерных параметров на колебания температуры в самой стенке.

Разработанная приближенная модель «W0D» вполне удовлетворительно предсказывает температурные колебания жидкости и может быть использована в качестве граничного условия для моделирования турбулентных течений в трубах методом DNS.

Список литературы

1. Код ANES [Электронный ресурс]. URL: http://anes.ch12655.tmweb.ru (дата обращения: 10.04.2020).
2. Артемов В.И., Макаров М.В., Яньков Г.Г., Минко К.Б. Использование гибридной LES/RANS-модели турбулентности для исследования процессов теплообмена при течении жидкости с переменными свойствами в трубах // Труды 7-й Российской национальной конференции по теплообмену. М.: Издательский дом МЭИ. 2018. Т. 1. С. 137–142.
3. Сукомел Л.А. Разработка метода и результаты экспериментального исследования теплоотдачи и температурных полей при течении воды в трубе // Дисс. На соискание ученой степени на звание к.т.н., Москва МЭИ. 1984.

Работа поддержана грантом Правительства РФ (№ 14.Z50.31.0042)

УДК 51.72

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ПУЗЫРЬКА ВБЛИЗИ ТВЕРДЫХ ОБЪЕКТОВ В АКУСТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Бурмистров М.Е., Питюк Ю.А., Зарафутдинов И.А.

Центр микро- и наномасштабной динамики дисперсных систем,
Башкирский государственный университет, Уфа

e-mail: MatvejBurmistrov@yandex.ru

Исследование сложных многофазных потоков, состоящих из газовых, жидких и твердых фаз, представляет значительный интерес для науки и множества новых технологий. Это включает в себя различные применения в биомедицине, экологии и производственных технологиях. Например, пенная флотация применяется для очистки воды от органических веществ и твёрдых взвесей, разделения смесей в химической, пищевой и других отраслях промышленности [1].

В данной работе рассмотрена динамика пузырька в потенциальном потоке несжимаемой жидкости под действием акустического поля вблизи твердых объектов, таких как неподвижная бесконечная стенка и подвижная сферическая частица. Движение жидкости описывается уравнениями Эйлера. Давление в газе определяется согласно некоторому политропному процессу, а давление в жидкости изменяется согласно действующему акустическому полю. Движение точек поверхности пузырька и частицы описывается кинематическим уравнением. Изменение потенциала скорости на поверхности пузырька определяется интегралом Коши-Лагранжа. Основная цель такого моделирования состоит в том, чтобы понять взаимодействие между пузырьком и твердым объектом, а также представить сравнительный анализ наличия бесконечных неподвижных и конечных подвижных объектов.

Задача решается численно методом граничных элементов (МГЭ), который обеспечивает относительно низкую вычислительную стоимость и позволяет вычислять потенциал скорости в трехмерных областях произвольной формы. Ранее МГЭ использовался авторами для изучения динамики пузырька вблизи стенки [2]. модификация МГЭ для кластера, содержащего пузырьки и частицы представлена в работе [3].

В рамках работы изучения совместной динамики пузырька и частицы проведены многопараметрические расчеты и построены зависимости изменения объема пузырька, динамики центра масс пузырька и частицы от расстояния между дисперсными включениями и их размеров. Показано, что при расширении пузырька, частица отталкивается от него, а при сжатии – притягивается, размер частицы определяет ее мобильность. В среднем за пять периодов колебаний акустического поля расстояние между объектами уменьшается, что обусловлено поступательным движением пузырька в фазе сжатия.

Для понимания особенностей динамики пузырька вблизи твердых объектов важно провести анализ гидродинамических потоков. С этой целью разработан программный модуль для расчета и визуализации картины течения жидкости в различных плоскостях сечения. На рис. 1 и 2 представлены картины течения жидкости при осцилляции пузырька вблизи стенки и твердой частицы соответственно. Анализ гидродинамических потоков показал, что в фазе сжатия пузырька поток жидкости направлен в сторону пузырька, а в фазе расширения – поток меняет направление. При определенных параметрах акустического поля и расстояния между объектами образуется струя, направленная в сторону стенки (рис. 1б) и частицы (рис. 2б).

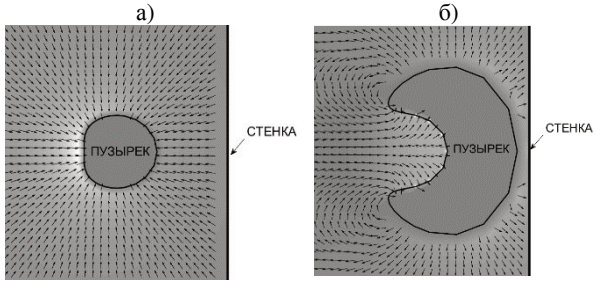


Рис. 1 Картина течений жидкости при колебании пузырька вблизи твердой стенки.

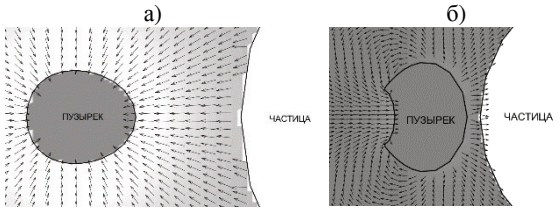


Рис. 2 Картина течений жидкости при колебании пузырька вблизи частицы.

Список литературы

1. Nguyen A.V., Ralston J., Schulze H. J. On modelling of bubble-particle attachment probability in flotation // Int. J. Miner. Process. 1998. V. 53. P. 225–249.
2. Питюк Ю.А., Гумеров Н.А., Абрамова О.А., Зарафутдинов И.А., Ахатов И.Ш. Численное исследование взаимодействия двух деформируемых пузырьков в акустическом поле// Прикладная механика и техническая физика. 2019. Т. 60. №4. С. 81–90.
3. Zarafutdinov I.A., Gainetdinov A.R., Pityuk Yu.A., Abramova O.A., Gumerov N.A., Akhatov I.Sh. GPU acceleration of bubble-particle dynamics simulation// Communications in Computer and Information Science (CCIS). 2018. V. 910. P. 235–250.

Работа поддержана РФФИ (грант № 18-38-20102)

УДК 519.685.4

АНАЛИЗ ИНДИКАТОРНЫХ ДИАГРАММ МЕТОДОМ CRMIP ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ВЗАИМОВЛИЯНИЯ СКВАЖИН

Бухмастова С.В., Питюк Ю.А., Батырова Л.Д.

ООО «РН-БашНИПИнефть», Уфа

e-mail: Bukhmastovasv@bnipi.rosneft.ru

Данная работа посвящена анализу взаимовлияния между нагнетательными и добывающими скважинами. Информация о взаимовлияющих скважинах используется для таких производственных задач, как поиск источников обводнения из фонда нагнетательных скважин и подбор оптимального режима работы скважин. Для выявления взаимовлияния скважин необходимо, чтобы на нагнетательной скважине менялся режим работы. Одним из источников получения таких данных являются данные по исследованиям методом установившихся режимов закачки (ИД – индикаторные диаграммы).

В рамках данной работы разработан алгоритм и реализован программный модуль для анализа взаимовлияния скважин на основе емкостно-резистивной модели (Capacitance-Resistance Model Injector-Producer Pair Based Representation, CRMIP [1, 2]). Метод CRMIP основан на уравнении материального баланса:

$$\tau_{ij}\frac{dq_{ij}(t)}{dt}+q_{ij}(t)=f_{ij}w_i(t)-\tau_{ij}J_{ij}\frac{dp_j(t)}{dt}, \qquad (1)$$

где $w_i(t)$ – расход i-ой нагнетательной скважины; $p_j(t)$ – давление на забое j-ой добывающей скважины; $q_{ij}(t)$ – дебит жидкости j-ой добывающей скважины; f_{ij} – параметр взаимосвязи скважин; τ_{ij} – временной параметр; J_{ij} – параметр продуктивности.

На вход подаются приемистость, дебит жидкости и забойное давление на добывающих скважинах. На основе входных данных и решения задачи оптимизации вычисляются коэффициенты, описывающие взаимосвязь между нагнетательными и добывающими скважинами (f_{ij},τ_{ij},J_{ij}). Задача оптимизации решается в среде Python при помощи функции minimize (метод Нелдер-Мида).

Разработанный модуль апробирован на синтетических и промысловых данных. В ходе проведения исследования в радиусе предполагаемого влияния нагнетательной скважины, где было проведено исследование методом ИД, выбирались добывающие скважины и рассчитывалась матрица коэффициентов взаимовлияния между ними.

Рассмотрена работа модуля CRMIP на конкретном промысловом примере: участке месторождения, состоящем из одной возмущающей нагнетательной скважины и одной реагирующей добывающей скважины. На данном участке месторождения было проведено исследование методом ИД. Анализ результатов ИД показал явную гидродинамическую связь между рассматриваемыми скважинами.

Коэффициент взаимовлияния между скважинами, вычисленный методом CRMIP, равен 0.78. По полученному коэффициенту можно утверждать, что модуль определил наличие взаимовлияния между скважинами, что совпадает с экспертным мнением.

На рис.1 представлены результаты численного моделирования методом CRMIP. Из графика видно, что кривая рассчитанного дебита жидкости на добывающей скважине коррелирует (светло-серая кривая) с исходной кривой (темно-серая кривая) и повторяет ее динамику. Невязка равна 5%.

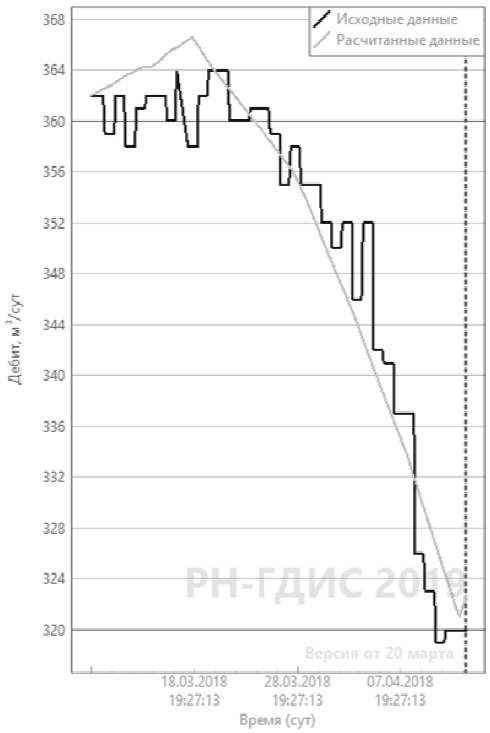


Рис.1 Динамика дебита жидкости на добывающей скважине.

Модуль, на основе метода CRMIP, позволяет сэкономить время и трудозатраты на интерпретацию динамических данных исследования методом ИД для поиска взаимовлияющих скважин за счет автоматизации процесса нахождения коэффициентов взаимовлияния.

Список литературы

1. Sayarpour, M. Development and Application of Capacitance-Resistive Models to Water/CO2 Floods. Phd dissertation, University of Texas. Austin. Texas. USA. 2008. 218.
2. Holanda, R. W. d. Capacitance Resistance Model in a Control Systems Framework: a Tool for Describing and Controlling Waterflooding Reservoirs. Master's thesis. Texas A&M University. College Station. Texas. USA. 2015. P. 156.

УДК 621.822.575

РАЗРАБОТКА УПРОЩЁННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАБОТЫ ЛЕПЕСТКОВОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДШИПНИКА

Волков-Музылёв В.В.[1], Борисов Ю.А.[1,2], Бесчастных В.Н.[3]

[1] Объединённый институт высоких температур РАН, Москва
[2] Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва
[3] ПАО «НПО «Алмаз» (ТОП) «ЛЭМЗ» НПЦ САЭС

e-mail: vladimir_muzylev@mail.ru

В настоящее время по всему миру возрос интерес к разработке и внедрению газодинамических подшипников в быстроходных лопаточных машинах различного назначения [1]. Это связано с высокими скоростями вращения рабочих колёс, с ужесточением требований по их надежности, габаритным размерам и массе. Всё это вызывает необходимость совершенствования подшипниковых узлов.

Газодинамические подшипники имеют множество преимуществ [2] по сравнению с подшипниками на жидкой и консистентной смазке. Например, работоспособность при высоких и низких температурах, низкий уровень шума и вибрации, долговечность и надежность, отсутствие контакта между вращающимся ротором и неподвижным статором при номинальном режиме работы, малое трение и тепловыделение, отсутствие системы смазки и вспомогательных систем с ней сопряженных, предельно низкие массы и габариты.

На основании проведённого обзора газовых подшипников было выявлено, что одной из перспективных конструкций является конструкция газодинамического подшипника, разработанного Деннисом Вайссертом [3], представляющего собой систему из лепестков и пружин, установленных в специальные пазы втулки подшипника, которая является статором (Рис.1).

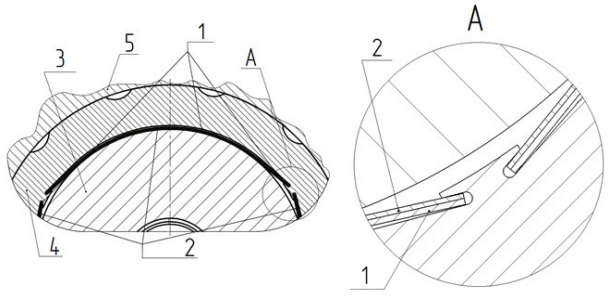


Рис. 1. Конструкция лепесткового газодинамического подшипника: 1 – пружина вторичной (механической) жесткости, 2 – лепесток, 3 – втулка газодинамического подшипника, 4 – обойма газового подшипника, 5 – корпус.

Данная конструкция обеспечивает минимальное упругое поджатие лепестков при невращающемся роторе, а антифрикционное напыление на их поверхности препятствует износу при его пуске и останове. При раскручивании ротора между валом и лепестками подшипника за счет вязкого трения формируется течение газа, вследствие чего образуется клиновидный микроканал. В связи с этим актуальной задачей является моделирование рабочих процессов, протекающих в зазоре и вторичной механической упругой системе радиального газодинамического подшипника лепесткового типа.

Для решения данной задачи подходят современные расчётные пакеты, позволяющие моделировать газо- и гидродинамику смазочного слоя, что даёт возможность получить форму микроканала путём последовательных приближений, при котором газовая нагрузка будет уравновешиваться реакциями со стороны упругих элементов пружины газодинамического подшипника.

В результате проведённого исследования была рассмотрена конструкция газодинамического подшипника, а также её принцип работы. Разработана упрощённая математическая модель и методика определения жесткости отдельно стоящих балок лепесткового газодинамического подшипника. Определены подходы к проектированию подшипника по заданным геометрическим параметрам пружины и лепестка с целью получения зазора, при котором система из лепестков и пружин вторичной (механической) жесткости и вращающийся вал будут находиться в состоянии равновесия при номинальном режиме работы.

Список литературы

1. Agraval G.L. Foil Air/Gas Bearing Technology – An Overview // Turbo Expo Proc. 1997. № GT-347.
2. Волков-Музылёв В.В., Борисов Ю.А., Калашников Д.А. Исследование характеристик течения Куэтта-Тейлора в современных газодинамических подшипниках // Наукоград наука производство общество. 2017. Т. 12, № 2. С. 63–65.
3. Dennis H. Weissert. Compliant foil fluid film radial bearing // Current Assignee: Capstone Turbine Corp. Pat.№ USRE39190E1.

УДК 004.942

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗЛЕТА ГАЗОПЫЛЕВОГО ШАРА МЕТОДОМ SPH-IDIC

Давыдов М.Н.[1,2], Стояновская О.П.[1,2], Глушко Т.А.[1,2]

[1] Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск
[2] Новосибирский государственный университет

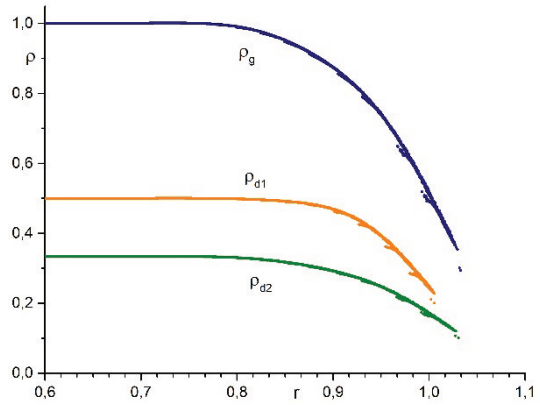
e-mail: davydov@hydro.nsc.ru

При движении газа с мелкими пылевыми частицами происходит интенсивное межфазное взаимодействие, которое накладывает свои особенности на численное моделирование подобных течений [2,3]. В частности, возникают новые характерные величины – времена релаксации скоростей фаз. В результате временной шаг для устойчивости расчета требуется уменьшать до минимального характерного времени. Авторами предложен новый метод расчета межфазного взаимодействия, основанный на расчете трения в ячейках (IDIC – Implicit Drag in Cell), позволяющий обойти данное ограничение [1], и проведено моделирование ряда задач на основе комбинации предложенного подхода и метода сглаженных гидродинамических частиц (SPH – Smooth Particle Hydrodynamics).

В докладе представлены результаты численного моделирования разлета газопылевого шара в вакуум. Среда, состоящая из идеального газа и двух фракций пыли, в начальный момент покоится и занимает сферический объем радиуса 1.0 в начале координат. Начальные плотности газа и пылевых фракций 1.0, 0.5 и 0.3333 соответственно. Первая фракция пыли с большим временем релаксации, а вторая с малым.

Моделирование проводилось в 3D постановке, изначально SPH частицы располагались равномерно, их число для каждой фазы было примерно 247 тыс, шаг сглаживания h=0.1, размер ячейки в методе IDIC 0.5h.

На рисунке показано распределение плотностей фаз по радиусу вблизи границы среды к моменту времени 0.06, хорошо видно, что от свободной поверхности распространяется волна разрежения. В этой зоне, естественно, уменьшаются как энергия, так и давление газа.

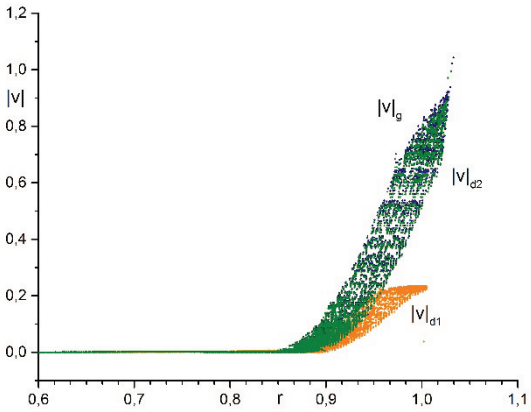


Незначительные неоднородности, видимые на фронте волны, связаны с несимметричной, относительно радиальной координаты, расстановкой частиц. Граница первой фракции пыли за данное время практически не сдвинулась, что объясняется её бо̀льшим временем релаксации, которое еще увеличивается в зоне разрежения (s –радиус пылевой частицы):

$$t_{stop} \approx s/\rho_g$$

Граница второй фракции пыли находится на одном уровне с границей газа, можно полагать что шар с данными фазами расширился до радиуса 1.05. Вторая фракция движется синхронно с газом, поскольку время её релаксации даже на свободной границе, где также наблюдается его увеличение, оказалось меньше чем время расчета.

На следующем рисунке показано распределение величины скорости SPH частиц для всех фаз. Виден характерный «шлейф», ширина которого соответствует размеру вспомогательной ячейки для осреднения в методе IDIC. Облако частиц первой фракции пыли явно отделяется от газовых частиц и частиц второй фракции, значения скоростей в нем существенно меньше.



Облака частиц для газовой фазы и второй фракции «накладываются» друг на друга, видно, что все особенности распределения скорости у них совпадают.

Указанные особенности течения соответствуют полученным и верифицированным результатам для одномерного случая. Таким образом, проведенное моделирование показало, что метод работоспособен в трехмерном случае и даже на небольшом числе частиц показывает физически корректные результаты

Список литературы

1. Stoyanovskaya O.P., Glushko T.A., Snytnikov N.V., Snytnikov V.N. Two-fluid dusty gas in smoothed particle hydrodynamics: Fast and implicit algorithm for stiff linear drag // Astronomy and Computing. 25. 2018. P. 25–37.
2. Monaghan J., Kocharyan A. SPH simulation of multi-phase flow // Computer Physics Communications. 1995. V. 87. P. 225–235.
3. Monaghan J. On the integration of the SPH equations for a dusty fluid with high drag // European Journal of Mechanics – B/Fluids, 2020. V. 79. P. 454–462.

Метод разработан за счет гранта РНФ № 19-71-10026. Численное моделирование проведено при поддержке РФФИ (грант № 19-08-01010).

УДК 551.465

ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ НА СЕВЕРО-ЗАПАДНОМ ШЕЛЬФЕ ЧЕРНОГО МОРЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ФИЗИЧЕСКОГО РЕАНАЛИЗА

Дорофеев В.Л., Сухих Л.И.

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь

e-mail: viktor.dorofeev@mhi-ras.ru

Общая площадь шельфовой зоны Черного моря составляет примерно четверть его акватории. При этом основная ее часть приходится на северо-западный шельф (СЗШ), занимающий шестнадцать процентов площади поверхности бассейна [1]. Важное значение этого региона для формирования термохалинной и биогеохимической структуры вод Черного моря определяется тем, что основная масса пресной воды со стоками рек (примерно 65□) поступает на СЗШ. Вместе с ними поступают биогены, влияющие на состояние морской экосистемы. Из-за малых глубин циркуляция вод на СЗШ имеет свои особенности по сравнению с глубоководной частью моря. В представленной работе анализируется циркуляции вод на СЗШ на основе результатов ретроспективного анализа (реанализа), выполненного для двадцатилетнего периода (1993 – 2012гг.).

Метод реанализа, получивший в последнее время широкое распространение, включает в себя следующие основные элементы: численную гидродинамическую модель, данные измерений и алгоритм их ассимиляции в модели. В данной работе используются результаты физического реанализа гидродинамических полей Черного моря, описанные в статье [2]. В ней использовался вариант модели циркуляции Черного моря, разработанной в МГИ [3], с пространственным шагом 4.8 км, что позволило адекватно описывать синоптические процессы. По вертикали модель содержит 35 расчётных z-уровней. В цитированной работе ассимилировались спутниковые данные температуры поверхности моря и аномалии возвышения свободной поверхности. Также в глубоководной части бассейна использовалась процедура ассимиляции среднегодовых профилей температуры и солености для поддержания базовой стратификации. Ассимиляция поверхностной температуры позволяет более точно описывать термодинамические процессы в приповерхностном слое моря. При ассимиляции же спутниковой альтиметрии происходит коррекция распределения поля плотности. В результате, уточняется циркуляция вод верхнего слоя моря.

На основе выполненного реанализа были получены гидрологические поля и поля течений на срок двадцать лет на регулярной сетке с дискретностью одни сутки. Для анализа общих свойств течений на северо-западном шельфе поля течений были усреднены за месячный период, и в дальнейшем анализе использовались среднемесячные значения гидродинамических полей. В целом, циркуляция на СЗШ носит циклонический характер, что связано с преобладанием циклонической завихренности поля ветра над акваторией западной части Черного моря. Но из-за мелководности этого района, течения быстрее реагируют на воздействие ветра, чем в глубоководной части моря. Поверхностные течения направлены, в основном, на юго-запад. Вдоль западного берега образуется компенсационное течение, направленное к югу, за исключением летних месяцев, когда воздействие ветра существенно ослабевает. Характерной особенностью вод возле западного берега является сильная горизонтальная стратификация, вызванная поступлением пресной воды со стоками рек, главным образом Дуная. Наиболее ярко горизонтальная стратификация проявляется в зимний сезон, когда поверхностные течения прижимают воду к западному берегу. В результате, в зимние месяцы в поверхностном слое моря наблюдается вдольбереговое интенсивное струйное течение, направленное к югу. В летний сезон область распресненных вод расширяется, и горизонтальный градиент плотности уменьшается. В этот период выраженного вдольберегового течения не наблюдается. Интересной особенностью циркуляции на СЗШ является наличие вдольберегового струйного противотечения, направленного к северу. Центр этого противотечения расположен примерно на горизонте 20 метров. Его глубина может меняться, но само противотечение наблюдается в течение всего года.

Описанная выше схема циркуляции на СЗШ основа на среднемесячных климатических полях, осредненных для каждого месяца по всему двадцатилетнему периоду. В то же время, для конкретного года картина циркуляции может существенно меняться. Она зависит не только от ветрового воздействия, но и от водообмена через границу шельфа с глубоководной частью бассейна, в частности от положения струи Основного Черноморского течения.

Список литературы

1. Иванов В.А., Белокопытов В.Н. Океанография Черного моря // Севастополь: НПЦ ЭКОСИ-Гидрофизика. 2011. 209 с.
2. Dorofeev V.L., Sukhikh L.I. Analysis of variability of the Black Sea hydrophysical fields in 1993–2012 based on the reanalysis results // Physical Oceanography. 2016. Iss. 1. P. 33–47.
3. Демышев С.Г., Коротаев Г.К. Численная энергосбалансированная модель бароклинных течений океана с неровным дном на сетке С // Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане. М. ИВМ РаН. 1992. С. 163–231.

Работа поддержана РНФ (грант № 17-77-30001)

УДК 536.253:533.95:533.98

ДИНАМИКА КОНВЕКТИВНОГО ФАКЕЛА ОТ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В КСЕНОНЕ ПРИ ВЫСОКОМ ДАВЛЕНИИ

Котов М.А., Лаврентьев С.Ю., Соловьев Н.Г., Шемякин А.Н., Якимов М.Ю.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

e-mail: 1993serj@gmail.com

Непрерывный и импульсно-периодический оптические разряды (ОР) позволяют поддерживать LTP-плазму с температурой почти полной однократной ионизации в замкнутых колбах с инертным газом высокого давления, пропуская лазерное излучение сквозь прозрачную стенку. Этот принцип положен в основу получивших распространение в последние годы широкополосных лазерно-плазменных источников излучения высокой яркости на основе ОР [1].

Одним из главных требований, предъявляемых к таким источникам, является высокая временная и пространственная стабильность излучения. Плазма стационарного ОР в поле силы тяжести вызывает в плазмообразующем газе интенсивную конвекцию, которая сопровождается колебаниями конвективного факела, влияющими на стабильность положения и яркость плазмы ОР. Основная причина осцилляций, как показано в данной работе, связана с гидродинамикой конвективного теплоотвода, о чем свидетельствует также количественное подобие осцилляций конвективного потока ОР пульсирующим режимам горения пламен, на которое указано в работе [2].

В данной работе представлены оригинальные экспериментальные результаты в сравнении с результатами математического моделирования пульсаций конвективного факела от сосредоточенного источника тепла, эквивалентного НОР.

Конвективный факел разогретого до высокой температуры газа формируется по механизму термогравитационной конвекции в результате теплопроводностного переноса тепла к окружающему газу от плазмы ОР, поддерживаемой за счет поглощения лазерного излучения. В этом процессе плазма рассеивает примерно пятую части мощности подводимого к ней лазерного излучения [1].

В экспериментах в ксеноне при давлении от 15 до 45 бар ОР, способ организации которого аналогичен описанному в [2], инициировался кратковременным электрическим разрядом, после чего поддерживался за счет поглощения лазерного излучения на пересечении сфокусированных лучей двух непрерывных и/или импульсно-периодических диодных лазеров. Изображение конвективного факела получали теневым методом путем просвечивания зоны вокруг ОР по схеме, аналогичной [2]. Теневое изображение регистрировалось с помощью скоростной видеосъемки на цифровую камеру.

При математическом моделировании решалась задача конвекции вокруг локального источника тепловыделения, находящегося в сферической кварцевой колбе с внутренним диаметром 16.3 мм (стенка толщиной 2 мм), температура на наружной поверхности которой задана. Тепловыделение мощностью 10 Вт было равномерно распределено по объему вытянутого сфероида диаметром 0.3 мм и длиной 0.5 мм, находящегося в центре колбы. Геометрия задачи отвечает условиям поддержания ОР в лазерно-плазменном источнике излучения ЛПИ-50 [1].

Задача решалась в системе численного моделирования задач гидроаэродинамики ANSYS CFX. Решалась нестационарная система уравнений Навье-Стокса для сжимаемого газа, находящегося в поле силы тяжести. Необходимые зависимости плотности, теплопроводности, теплоемкости и вязкости ксенона от температуры и давления в диапазоне от 300 ^{0}K до 15000 ^{0}K были взяты, в частности, из [3].

В качестве начального условия для решения динамической задачи использовалось решение задачи о конвективном факеле, близкое к стационарному. За счет этого удалось сократить время вычислений, при котором успевали развиться колебания факела, до нескольких периодов осцилляций (100 мс).

В предварительных расчетах были получены динамические распределения температуры, плотности и скорости газа вокруг области тепловыделения при трех значениях давления, установившегося в процессе нагрева газа в замкнутом объеме. Было получено хорошее качественное и количественное соответствие динамики расчетных распределений экспериментальным результатам. Отмечено близкое совпадение расчетных распределений плотности и теневых изображений конвективного факела ОР в одних и тех же фазах осцилляции. В расчетах показано, что пульсации возникают вследствие периодического образования тороидального вихря у нижней границы тепловой волны от области локального энерговыделения, его развития и отрыва от основного факела.

Некоторое несоответствие результатов моделирования экспериментальным данным проявляется в занижении расчетных частот пульсации по сравнению с полученными экспериментально. Вероятная причина этого в недостаточной длительности временной области расчета для установления стационарного режима течения во всем разрядном объеме.

Список литературы

1. Зимаков В. П., Кузнецов В.А., Соловьев Н.Г. и др. Новые возможности применения оптических разрядов в аэрофизическом эксперименте // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2016. Т. 17 (2) http://chemphys.edu.ru/issues/2016-17-2/articles/653/
2. Lavrentyev S.Yu., Solovyov N.G., Shemyakin A.N., et al. Buoyancy driven convection instability and related pulsing of continuous optical discharges // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1394. P. 012012 https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1394/1/012012/pdf
3. Murphy A.B., Tam E. Thermodynamic properties and transport coefficients of arc lamp plasmas: argon, krypton and xenon // J. Phys. D: Appl. Phys. 2014. V. 47. P. 295202.

Работа поддержана РФФИ (грант № 18-01-00534 А)

УДК 620.91

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СОВМЕСТНОГО ГОРЕНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО И ГАЗОВОГО ТОПЛИВА

Кузнецов В.А., Дектерев А.А., Минаков А.В.

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

e-mail: victor_partner@mail.ru

В настоящее время для оптимизации и проектирования горелочно-топочных устройств пылеугольных котлов широко и успешно используется математическое моделирование, основанное на стационарном приближении с использованием моделей турбулентности, основанных на осредненных уравнениях переноса [1-6]. Однако, такой подход не позволяет исследовать устойчивость горения, процессы локального воспламенения, срыва пламени, переходные процессы и процессы при изменении нагрузки, типа топлива и др. Для этой цели предполагается развить нестационарные методы моделирования для условий совместного горения пылеугольного и газового топлива.

Для описания нестационарного течения были рассмотрены вихреразрешающие методы моделирования турбулентности. Решение уравнения переноса лучистой энергии базируется на методе дискретных ординат. Коэффициенты поглощения газа вычисляются по модели суммы серых газов, коэффициенты поглощения и рассеяния частицами определяются по аппроксимации оптически крупных частиц. Для описания процессов движения частицы используется метод Лагранжа. Учет турбулентности потока при движении частицы производится введением случайных флуктуаций скорости газа в уравнение движения для частиц на основе подхода. Для моделирования нестационарного турбулентного горения газа была выбрана модель EDC (Eddy Dissipation Concept), предложенная в работе (Magnussen, 1989). В рамках этой модели предполагается, что часть газа полностью перемешивается в так называемых “тонких структурах” в которых и происходит химическое реагирование. Скорость и масштаб перемешивания определяются локальными характеристиками турбулентного потока. Процесс горения угольной частицы представлялся в виде следующих последовательных этапов: испарение влаги из топлива, выход и горение летучих компонент и горение коксового остатка. Выход летучих рассматривается в однокомпонентном приближении в виде вещества CxHyOz. Для расчета скорости выхода летучих веществ используется одностадийная кинетическая модель. Скорость горения коксового остатка рассчитывается согласно положениям классической диффузионно-кинетической теории.

Задача решалась в трехмерной нестационарной постановке. Использовалась неструктурированная расчетная сетка с локальным сгущением вблизи сопла и области формирования факела. Дискретизация уравнений переноса осуществлялась по методу контрольного объема. Временной шаг удовлетворял условию: средний CFL<2.

Проведено численное исследование процессов сжигания пылевидного угля в газовом пламени на основе предложенной математической модели процессов нестационарного горения, с применением вихреразрешающей модели турбулентности, сложного теплообмена и редуцированного механизма для химической кинетики. Результаты расчетов свидетельствуют о том, что математическая модель процессов позволяет качественно правильно решать трехмерные задачи, такие как совместное сжигание метана и угля в открытом пламени. Предложенная модель позволит проводить анализ устойчивости горения газо-угольных пламен и переходных процессов сопровождающих изменение режимов подачи топливно-окислительной среды.

Список литературы

1. Chernetskiy M.Yu., Dekterev A.A., Burdukov A.P., Hanjalić K. Computational modeling of autothermal combustion of mchanically-activated micronized coal. Fuel. 2014.V. 135, P. 443-458.
2. Peters A.A.F., Weber R. Mathematical modeling of a 2.4 MW swirling pulverized coal flame. Combustion Science and Technology. 1997. V. 122(1-6). P. 131–182.
3. Чернецкий М. Ю., Дектерёв А. А. Математическая модель процессов теплообмена и горения пылеугольного топлива при факельном сжигании // Физика горения и взрыва. 2011. № 47(3). С. 37–46.
4. Krasinsky D.V., Salomatov V.V., Anufriev I.S., Sharypov O.V., Shadrin E.Y., Anikin Y.A. Modeling of pulverized coal combustion processes in a vortex furnace of improved design. Part 2: Combustion of brown coal from the Kansk-Achinsk basin in a vortex furnace. Thermal Engineering (English translation of Teploenergetika). 2015. V. 62(3). P. 208–214.
5. Chernetskiy M.Yu., Kuznetsov V.A., Dekterev A. A., Abaimov N.A., Ryzhkov A.F. Comparative analysis of turbulence model effect on description of the processes of pulverized coal combustion at flow swirl // Thermophysics and Aeromechanics. 2016. V. 23. P. 591–602.
6. Maidanik M.N. et al. Mathematical simulation of the furnace and turning gas conduit of a P-50R boiler during joint combustion of solid and gaseous fuel. Thermal Engineering (English translation of Teploenergetika). 2011. V. 58(6), P. 483–488.

Работа поддержана РФФИ (грант № 19-08-00781)

УДК 536.2

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В КРУПНОГАБАРИТНОМ ПОМЕЩЕНИИ ПРИ РАБОТАЮЩЕМ ГАЗОВОМ ИНФРАКРАСНОМ ИЗЛУЧАТЕЛЕ

Кузнецов Г.В., Максимов В.И., Нагорнова Т.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

e-mail: elf@tpu.ru

В последнее время принят ряд законов РФ по повышению энергоэффективности. Значительная часть всего энергопотребления большинства государств приходится на промышленные объекты (как на сам производственный процесс, так и на обогрев промышленных комплексов, занимающих, как правило, большие площади и объемы). Но тепловая энергия достаточно часто расходуется неэффективно. Поэтому, в частности, повышенное внимание стало уделяться и системам лучистого обогрева жилых и в большей степени производственных помещений, т.к. эффективность таких систем отопления по сравнению со стандартными воздушным и водяным постоянно подтверждается [1].

Целью настоящей работы является математическое моделирование процессов теплопереноса в крупногабаритном производственном помещении, обогреваемом газовым инфракрасным излучателем.

При постановке задачи рассматривалась прямоугольная область, приведенная на рис. 1. Моделирование проводилось для крупногабаритного помещения с приближением к реальным условиям эксплуатации промышленного объекта: учитывался теплоотвод в ограждающие теплопроводные стенки, нагрев нижнего бетонного основания определялся величиной теплового потока q (поступающего от излучателя), которая варьировалась в зависимости от координаты x.

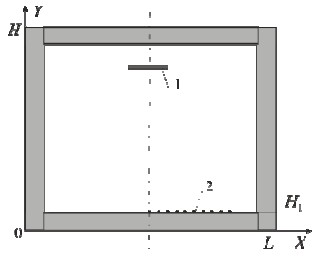
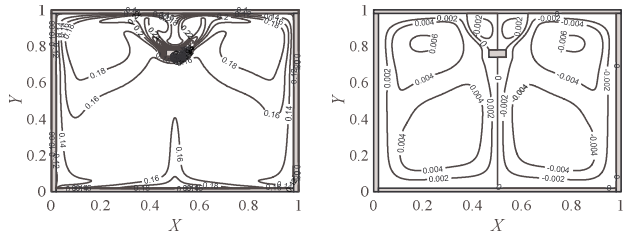


Рис. 1. Область исследования: L, H – длина и высота области соответственно, 1 – ГИИ, 2 – термопары.

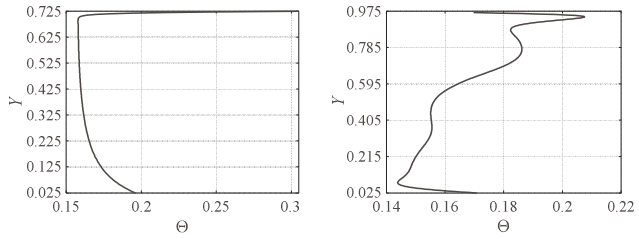
Двумерные безразмерные дифференциальные уравнения, описывающие нестационарный теплоперенос в рассматриваемой области (рис.1) (уравнения Навье-Стокса и энергии для газа записывались в преобразованных переменных (функция тока – вихрь скорости – температура). Сформулированы уравнения энергии для каждого из элементов области решения задачи (рис. 1)) с соответствующими начальными и граничными условиями.

На рис. 2 представлены результаты численного моделирования конвективно-кондуктивного теплопереноса в рассматриваемом помещении с системой отопления на базе ГИИ для момента времени τ, соответствующего 1 часу физического времени. На распределениях Θ для малых временных значений можно выделить зону высоких температур вблизи излучателя, ориентированного по направлению *X* (рис. 1). Видно, что в рассматриваемой области формируются две отдельных циркуляционных зоны: под ГИИ и над ним (рис. 2).



а б

Рис. 2. Поля температур (а) и изолинии функции тока (б).



а б

Рис. 3. Распределения безразмерных температур Θ по высоте рассматриваемой области в сечениях X = L/2 (а) и X = L/4 (б).

Особое внимание заслуживает распределение температуры по высоте помещения (рис. 3), поскольку этим параметром оперируют при анализе формирования комфортных тепловых условий. На рис. 3 представлено распределение безразмерных температур Θ по высоте рассматриваемой области в сечениях *X* = L/2 (*а*) и *X* = L/4 (*б*). Результаты выполненного математического моделирования Θ (*Y*) хорошо соответствуют установленным ранее экспериментально [2] закономерностям. На расстоянии равном среднему росту человека распределение температур относительно равномерное. Бетонное основание при этом прогрето достаточно хорошо (до Θ = 0,02, что соответствует 24 °C). Такой уровень Θ создает условия для теплового комфорта персонала в реальной практике.

Список литературы

1. Tian Z., Love J.A., Energy performance optimization of radiant slab cooling using building simulation and field measurements, Energy Build. 2009. V. 41. P. 320–330.
2. Kurilenko N.I., Mamontov G.Ya., Mikhaylova L.Yu. Temperature patterns in the gas infrared radiator heating area // EPJ Web of Conferences. 2015. V. 82. P. 01006.

Работа поддержана РНФ (грант № 20-19-00226)

УДК 551.465

СТРУКТУРА МЕЗОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕЙ ЧЕРНОГО МОРЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ С РАЗЛИЧНЫМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Пузина О.С., Мизюк А.И.

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь

e-mail: oksana_puzina@mhi-ras.ru

Настоящая работа посвящена исследованию особенностей прибрежных мезомасштабных вих-рей Черного моря по результатам численного моделирования С различным пространственным разрешением.

Численные эксперименты выполнены посредством комплекса численного моделирования океа-на NEMO [1]. Сопоставление выполняется для конфигураций с разрешениями ≈4,6 км (высокое разрешение) и ≈1,2 км (ультравысокое разрешение). По вертикали используется z-координата с дробным шагом у дна. Вертикальное турбулентное перемешивание параметризуется на основе гипотезы замыкания k-ε [2]. Для уравнения движения на твёрдых боковых границах ставится условие скольжения. Боковой турбулентный обмен описывается бигармоническим оператором.

Прибрежные вихри образуются между берего-вой линией и основный черноморским течением (ОЧТ) [3]. В настоящей работе исследуются различия структуры полей в области наиболее интенсивного квазистационарного антициклонического вихря – в районе Батуми.

Весной в расчёте с высоким пространственным разрешением наблюдаются цепочка мелких вих-рей, которые перемещаются вдоль юго-восточного побережья Чёрного моря. В этот же период в расчёте с разрешением 1/24º подобные вихри отсутствуют. Летом наблюдается вихрь слабой интен-сивности. В расчёте с высоким пространственным разрешением в конце лета скорость вихря возрастает, также увеличивается его размер. Высокое разрешение позволяет наблюдать процесс слияния вихрей, образованных к западу от Батумского антициклона перемещаются к данному вихрю и поглощаются им. В расчёте с высоким пространственным разрешением генерация вихря происходит позже. При этом его скорость ниже. В итоге, в расчётах с пространственным разрешением 1/96º вихревая динамика более проявлена, чем в расчёте с разрешением 1/24º.

Отметим, что температура в вихре выше, чем за его пределами. В период интенсификации такая разница температур выше, чем в период ослабления вихря и может составлять 1ºС. Противоположную картину наблюдаем в поле солёности, где значение солёности в вихре ниже, чем за его пределами. Однако, поведение разности солёности аналогичное: в период интенсификации вихря наблюдается высокая разность, при ослаблении соответственно – низкая.

С увеличением глубины скорость снижается. Вертикальная структура модуля горизонтальной скорости состоит из двух групп изолиний, имеющие параболическую форму. Глубина таких парабол может достигать 150 м. В случае температуры максимальное значение наблюдается в центральной части вихря. В отличие от скорости, вертикальный разрез состоит из одной параболы. Для солёности, вертикальная структура соответствует структуре температуры. Низкие значения солёности получены в центральной части вихря, за его пределами солё-ность выше.

Определено сезонное поведение мезомасштабного вихря, на примере Батумского антициклонического вихря, а также и его вертикальная структура.

Список литературы

1. Madec, G. NEMO Ocean Engine. Note du Pôle de modélisation. Technical Report. France: Institut Pierre-Simon Laplace. 2008. No. 27. ISSN No. 1288-1619. URL: https://www.nemo-ocean.eu/doc/NEMO_book.html [дата обращения: 11.03.2019].
2. Rodi, W. Examples of calculation methods for flow and mixing in stratified fluids // J. Geophys. Res. 1987. P. 5305–5328.
3. Иванов В.А., Белокопытов В.Н. Океанография Черного моря. Севастополь: МГИ НАН Украины. 2011. 212 с.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания № 0555-2019-0002 «Междисциплинарное численное моделирование и высокопроизводительные вычисления»

УДК 536.3+536.42

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТАЯНИЯ РАССЕИВАЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЕ ЛЬДА В ОДНОФАЗНОЙ ПОСТАНОВКЕ ЗАДАЧИ СТЕФАНА

Саввинова Н.А.[1], Слепцов С.Д.[2], Гришин М.А.[2]

[1] Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова
[2] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

e-mail: nasavv@mail.ru

Прогноз теплового состояния снежно-ледяных систем является актуальным в связи с освоением Арктики, глобальным потеплением климата. Лед, а также толща снега, представляют собой полупрозрачные среды, в которых тепло переносится совместно излучением и теплопроводностью. В данной работе численно моделируется нагрев и последующее плавление ледяного слоя в рамках радиационно-кондуктивного теплообмена (РКТ) в плоском слое поглощающей, излучающей и рассеивающей среды, на границу которой падает внешнее излучение. Математическая модель таяния льда представляет однофазную постановку задачи Стефана для полупрозрачной среды. Для решения радиационной части задачи использован модифицированный метод средних потоков, учитывающий объемное селективное поглощение среды, рассеяние излучения и селективный характер источника излучения.

Целью данной работы является дальнейшее развитие методики численного расчета РКТ [1] для полупрозрачного слоя льда с учетом рассеяния излучения. Результаты численного расчета сравнивались с экспериментальными данными, приведенными в [2].

Геометрическая схема задачи представляет собой плоский слой льда толщиной L_0, расположенный на вертикальной непрозрачной подложке и находящейся в среде с постоянной температурой T_∞. Правая поверхность плоского слоя льда облучается лампой с температурой накаливания нити 3200 К. Спектральный состав источника излучения аналогичен [1]. Авторы [2] отмечают, что в диапазоне длин волн излучения от 0,3 до 1,2 мкм (коротковолновый диапазон) рассеяние излучения значительно превалирует над поглощением, а в диапазоне длин волн от 1,2 мкм и выше (длинноволновый диапазон) наоборот, поглощение излучения во льду значительно превалирует над рассеянием. Коэффициенты объемного поглощения различаются на несколько порядков. Расчеты проведены с использованием алгоритма расчета радиационного потока при наличии изотропного рассеяния.

Решение задачи состоит из двух этапов. На первом этапе численно решается радиационно-кондуктивный теплообмен в слое льда до достижения правой границей температуры фазового перехода T_f. На втором этапе, численно решается РКТ при плавлении, в котором возникающая тонкая пленка воды стекает под влиянием сил тяготения, оказывая при этом дополнительную тепловую нагрузку в виде конвекции и излучения. Положение границы раздела фаз определяется из решения краевой задачи.

На рис. 1 представлен темп таяния плоского слоя льда при разных значениях альбедо рассеяния ω_2 для длинноволнового диапазона (ω_1 для коротковолнового диапазона принят равным 0,999). Расчеты показывают, что скорость таяния практически не зависит от альбедо рассеяния в длинноволновой части спектрального диапазона излучения, но наблюдается сильная зависимость роста температуры левой непрозрачной границы от альбедо рассеяния.

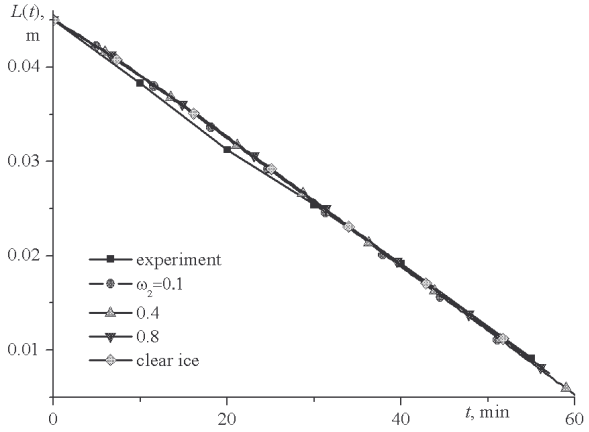


Рис. 1. Темп таяния льда при разных значениях альбедо ω_2 и сравнение с данными [2]

Представлена физико-математическая модель таяния льда с учетом рассеяния излучения в изотропном приближении, для учета реального рассеяния излучения необходимо разработать алгоритм моделирования индикатрисы рассеяния с привлечением экспериментальных измерений. Показано, что скорость таяния в большей степени зависит от альбедо рассеяния коротковолновой части спектрального диапазона, тогда как рост температуры левой части больше зависит от альбедо рассеяния в длинноволновом диапазоне спектра излучения при данном соотношении коэффициентов поглощения. Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными [2] показывает удовлетворительное согласие.

Список литературы

1. Слепцов С.Д., Саввинова Н.А. Таяние льда при облучении селективным источником теплового излучения // ТиА. 2019. Т. 26. № 5. С. 813–820.
2. Seki N., Sugawara M., and Fukusaki S. Radiative melting of ice layer adhering to a vertical surface // Wärme- und Stoffübertragung. 1979. V. 12. Iss. 2. P. 137–144.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН (проект АААА-А17-117022850029-9)

УДК 536.25

ОПЫТ ПРЯМОГО ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СВОБОДНОКОНВЕКТИВНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ВОЗДУХА НА ВЕРТИКАЛЬНОЙ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНЕ

Смирнов Е.М., Левченя А.М., Иванов Н.Г., Смирновский А.А.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

e-mail: levchenya_am@spbstu.ru

В работах [1,2] содержатся наиболее полные на сегодняшний день опытные данные по характеристикам турбулентного свободно-конвективного пограничного слоя воздуха у вертикальной пластины в условиях «естественного» перехода. Там же, как и в ряде других работ, отмечается, что результаты измерений неизотермических течений в условиях свободной конвекции обладают повышенной степенью неопределенности по сравнению со случаем вынужденной конвекции. В настоящее время прогресс в получении углубленных знаний о динамических и теплообменных процессах при свободной турбулентной конвекции все более связывается с применением методов прямого численного моделирования.

В представляемой расчетной модели свободноконвективный пограничный слой (Pr=0,7) развивается на нагретой пластине при возмущающем действии поперечного ряда прямоугольных препятствий (рис.1). Начальный расчетный опыт по применению макро-шероховатости данного вида для контролируемого запуска процессов возбуждения турбулентности в слое описан в [3].

Вычисления проведены для термических условий, соответствующих опытам с гладкой пластиной [1,2]: температура пластины T_w= 60°C, температура внешней среды T_a = 16°C. Конкретно, в качестве макрошероховатости рассматривался ряд параллелепипедов $l_x \times l_y \times l_z$ = 8×8×30 мм, расположенных с шагом 60 мм по размаху пластины. Местоположение препятствий характеризуется числом Грасгофа $Gr_{x,0}=0{,}7\cdot10^9$, которое рассчитывалось по расстоянию препятствий ($x = x_0$) от нижней кромки пластины. Число Грасгофа определяется традиционно: $Gr_x = g\beta(T_w-T_a)x^3/\nu^2$.

Плоскость ABCD на схеме расчетной области (рис.1) – поверхность нагретой пластины, вертикальный размер которой L = AB = DC = 2,5 м. Сегмент AD соответствует нижней кромке пластины (x = 0). На поверхности ADHE накладывались условия непроницаемости и скольжения. Трансверсальный размер области составлял 0,48 м; на плоскостях ABFE и DCGH ставились условия периодичности. Внешняя (входная) граница области EFGH отстояла от пластины на расстоянии 0,40 м. На ней задавалось условие постоянства температуры, равной T_a, и условие постоянства давления; для скорости реализовывались «мягкие» условия, но с предписанным её направлением по нормали к границе. На выходной границе BCGF задавалось условие постоянства давления.

Вычисления с применением программы ANSYS Fluent 17.0. проводились по уравнениям Навье-Стокса (в приближении Буссинеска), на основе метода дробных шагов по времени и центральных схем второго порядка в части пространственной дискретизации. Расчетная сетка содержала около 105 миллионов ячеек-гексаэдров и обеспечивала среднее значение нормализованного расстояния (Y^+) ближайшей к стенке расчетной точки, равное 0,3. При этом нормализованные размеры расчетных ячеек по двум другим направлениям составляли $\Delta x^+ \approx \Delta z^+ \approx 6$.

На рис.2, с использованием пристеночных масштабов, сравниваются расчетные и измеренные [1] профили нескольких характеристик моделируемого течения при $Gr_x=3{,}62\cdot10^{10}$: средней по времени скорости (U), средней температуры (T), среднеквадратичного значения пульсаций продольной скорости (u_{RMS}), корреляции скорости и температуры ($\langle ut \rangle$).

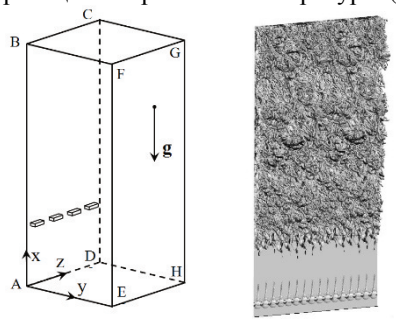


Рис. 1. Схема расчетной области и вихревая картина течения, визуализированная посредством Q-критерия.

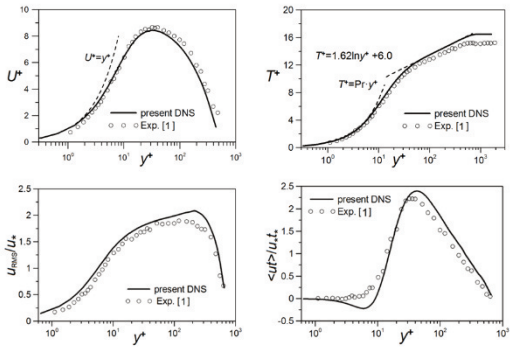


Рис. 2. Сопоставление расчетных и опытных профилей скорости, температуры и двух характеристик турбулентности в слое при $Gr_x=3{,}62\cdot10^{10}$.

Список литературы

1. Tsuji T., Nagano Y. Characteristics of a turbulent natural convection boundary layer along a vertical flat plate // Int. J. Heat Mass Transfer. 1988. V. 31. P. 1723–1734.
2. Tsuji T., Nagano Y. Turbulence measurements in a natural convection boundary layer along a vertical flat plate // Int. J. Heat Mass Transf. 1988. V. 31 P. 2101–2111.
3. Smirnov E. M., Abramov A.G., Smirnovsky A. A., Smirnov P. Numerical simulation of turbulence arising in the free convection boundary layer after a cross row of rectangular obstacles / Journal of Physics: Conference Series. 2018. V. 1128. P. 012090.

Исследование поддержано Российским научным фондом (грант № 18-19-00082)

УДК 532, 519.6

ДИНАМИКА ДЕФОРМИРУЕМЫХ КАПЕЛЬ В КАНАЛЕ С ДЕТЕРМИНИРОВАННЫМ БОКОВЫМ СМЕЩЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ

Солнышкина О.А.

Центр микро- и наномасштабной динамики дисперсных систем,
Башкирский государственный университет, Уфа

e-mail: olgasolnyshkina@gmail.com

Разработка и применение эффективных численных методов для трехмерного моделирования медленных течений в сложных областях актуально для микрогидродинамики, где одним из активно развиваемых в последние десятилетия приложений является конструирование систем диагностики на базе “лабораторий-на-чипе” (“lab-on-a-Chip”). Такие системы широко применяются в биофизике, биохимии и медицине для управления движением микрочастиц и, например, разделения и сортировки их по размерам, плотности, упругости.

Кроме того, разделение микрочастиц или клеток в соответствии с их уникальными физическими признаками, такими как размер, плотность, форма, деформируемость и поверхностный заряд, обеспечивает широкий спектр применений, таких как проточная цитометрия на биочипах, подготовка биологического образца, выделение и изоляция определенных типов клеток-мишеней (например, диагностика наличия раковых клеток в пробах крови или диагностика заболеваний), а также очистка воды от различных примесей.

Таким образом, одной из ключевых задач в данной области является подбор оптимальных параметров при конструировании различных типов микрофлюидных устройств (МФУ) со сложной внутренней структурой. Например, МФУ с элементами, расположенными с детерминированным боковым смещением (Deterministic Lateral Displacement, DLD), широко используются для сортировки микрочастиц в потоке. Как правило, сортирующее устройство состоит из большого числа круглых столбиков микронного диаметра, которые располагаются в шахматном порядке и разделяют ламинарный поток на несколько потоков с одинаковыми объемными расходами. Жесткие сферические частицы по-разному проходят сквозь такую систему столбиков: если радиус сферы меньше критического, она смещается вбок, если больше — двигается по зигзагу. Критический радиус определяется шириной столбиков и интенсивностью потока. Но биологические клетки имеют несферическую форму и легко деформируются. Поэтому траектория, по которой клетка двигается внутри сортирующего устройства, зависит от ее формы и ориентации, а эффективность сортировки сильно снижается по сравнению с идеальным случаем сферических частиц.

В данной работе рассматривается динамика деформируемых капель в объеме вязкой несжимаемой жидкости при течении под действием заданного постоянного объемного расхода в плоском микроканале прямоугольного поперечного сечения с внутренней структурой, состоящей из элементов различного поперечного сечения, расположенных поперек потока с детерминированным боковым смещением. Основу используемой математической модели составляют стационарные уравнения Стокса, которые являются основными гидродинамическими уравнениями при малых числах Рейнольдса (Re<1) и умеренных числах Струхаля (St~1).

Применяемый численный подход основан на методе граничных элементов для трехмерных задач, ускорение которого произведено как за счет высокоэффективного масштабируемого алгоритма (быстрый метод мультиполей), так и за счет использования гетерогенных вычислительных архитектур (многоядерные CPUs и графические процессоры GPUs). Предложенный метод позволяет напрямую рассчитывать динамику дисперсных объектов с высокой дискретизацией поверхности.

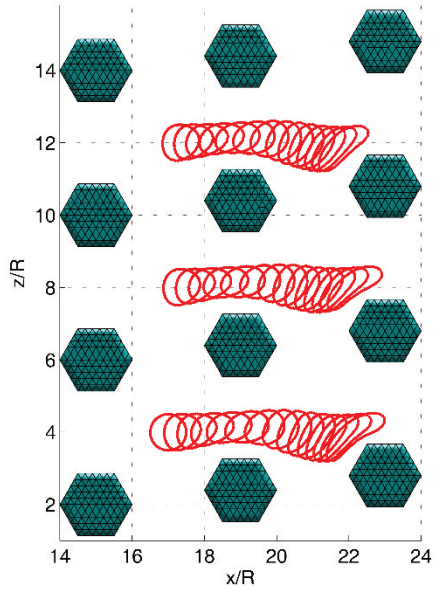


Рис. 1. Динамика деформируемых капель при обтекании недеформируемых нецилиндрических включений внутри плоского канала прямоугольного сечения в различные моменты безразмерного времени.

Изучено влияние совокупности параметров: капиллярного числа и соотношений вязкости внутренней и внешней жидкости, а также соотношения размеров капель и геометрических параметров области, на характеристики движение капель внутри микроканала с DLD системой столбиков (рис. 1.). Кроме того исследовалось влияние формы поперечного сечения столбиков.

Библиотека FMM предоставлена Fantalgo, LLC (Maryland, USA).
Исследование проведено при финансовой поддержке гранта Президента РФ МК-549.2019.1.

УДК 536.25

ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ ПЕРЕХОДЫ СТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОВОЙ КОНВЕКЦИИ В КВАДРАТНОЙ КАВЕРНЕ С ДВИЖУЩЕЙСЯ СТЕНКОЙ

Ступникова А.В., Шарифулин А.Н.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

e-mail: stypnast2014@yandex.ru, sharifulin@bk.ru

На сегодняшний день задача о циркуляции течения изотермической вязкой несжимаемой жидкости в квадратной каверне стала классической задачей гидромеханики [1].

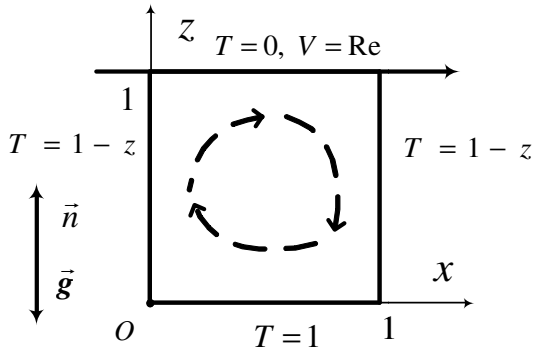


Рис. 1. Геометрия задачи о свободной тепловой конвекции в горизонтальном цилиндре квадратного сечения с движущейся верхней стенкой. Верхняя и нижняя грани поддерживаются при заданных температурах, а вертикальные боковые стенки идеально теплопроводны. Верхняя стенка может двигаться с постоянной скоростью в поперечном направлении.

Для многочисленных приложений интересно обобщение этой задачи на случай, когда полость равномерно подогревается (см. рис.1). Хорошо известно, что подогрев квадратной полости, даже в отсутствии движения стенки (Re=0), приводит к конвективной неустойчивости и сложным многовихревым течениям [2, 3].

В настоящей работе исследуются скачкообразные гистерезисные переходы в поведении воздушных вихрей в условиях суперпозиции этих двух ранее хорошо изученных по отдельности задач.

Задача исследуется в плоском приближении численно двухполевым методом с использованием конечно-разностного метода на равномерной сетке 64×64.

Решение определяется тремя критериями подобия, – числом Рейнольдса Re, числом Грасгофа Gr и числом Прандтля Pr, которое полагалось равным 0.7 (воздух).

Расчеты проведенные для интервалов $-20<\mathrm{Re}<20$, $0<\mathrm{Gr}<25000$ показали, что рядом с подвижной границей образуется пристеночная струя (см. Рис.2, область над линией тока 0.000), перерастающая в отдельный вихрь. В левом нижнем и правом нижнем углах каверны наблюдаются разномасштабные вихри Моффата, оказывающие огромное влияние на структуру течения.

Исследование влияния плавного циклического изменения скорости верхней стенки, т.е. числа Рейнольдса Re, показало, что для каждого надкритического значения числа Грасгофа Gr существует предельное значение числа Рейнольдса $\mathrm{Re}^{*}(Gr)$ такое, что при изменении числа Рейнольдса внутри интервала $|\mathrm{Re}|<\mathrm{Re}^{*}(Gr)$ течение перестраивается, плавно меняя структуру от одновихревого к двухвихревому и обратно. Если же изменение числа Рейнольдса выходит за указанный интервал, происходит жесткий гистерезисный переход.

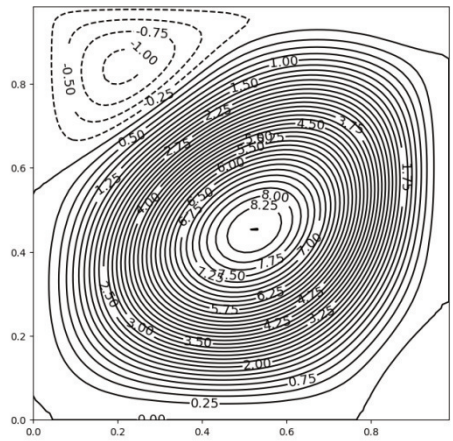


Рис. 2. Линии тока надкритического течения при Gr=25000 и Re=10.7. Видно отрывное течение и вихри Моффата.

Список литературы

1. Исаев С.А., Баранов П.А., Судаков А.Г., Мордынский Н.А. Численный анализ вихревой динамики и нестационарного турбулентного теплообмена в квадратной каверне с подвижной крышкой // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15. № 3. С. 491–504.
2. Mizushima J., Yusuke H. Routes to unicellular convection in a tilted rectangular // J. Physical Society of Japan. 2000. V. 69. № 8. P. 2371–2374.
3. Тарунин Е.Л. Вычислительный эксперимент в задачах свободной конвекции. Иркутск. Изд-во Иркутского ун-та. 1990. 223 с.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках госзадания ПНИПУ 2020

УДК 519.6

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ ДЛЯ ГИДРОПРОСЛУШИВАНИЯ СКВАЖИН

Фахреева Р.Р.[1,2], Питюк Ю.А.[1,2], Асалхузина Г.Ф.[1]

[1] ООО «РН-БашНИПИнефть», Уфа
[2] Башкирский государственный университет, Уфа

e-mail: FakhreevaRR@bnipi.rosneft.ru

На сегодняшний день ряд производственных задач строится на восстановленной информации о межскважинном пространстве. Одним из методов получения такой информации является гидропрослушивание (ГП). Таким образом, автоматизация анализа результатов ГП является актуальной задачей. Целью работы являлось определение коэффициентов взаимовлияния скважин на основе взаимного учета данных по давлению группы скважин. В связи с этим разработан программный модуль на основе метода Multivariate Linear Regression (MLR) [1].

Метод MLR основан на анализе давлений в скважинах с использованием уравнения многопараметрической линейной регрессии:

$$\hat{p}_j(t) = \beta_{0j} + \sum_{i=1}^{I} \beta_{ij} \Phi_i(t) \qquad (1)$$

где $\hat{p}_j$ – давление на *j*-ой реагирующей скважине (входной параметр), Φ_i – функция давления на *i*-ой возмущающей скважине (входной параметр), β_{ij} – весовые коэффициенты (расчетный параметр), показывающие вероятность влияния *i*-ой скважины на *j*-ую скважину; β_{0j} – свободный член (расчетный параметр), *t* – время, *I* – число возмущающих скважин.

С целью обучения системы решалась обратная нормированная задача на основе ретроспективного анализа динамических данных эксплуатации скважин, в результате которой получилась серия систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11}^2 & \cdots & \sigma_{1I}^2 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{I1}^2 & \cdots & \sigma_{II}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta_{1j} \\ \vdots \\ \beta_{Ij} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{1j}^2 \\ \vdots \\ \sigma_{Ij}^2 \end{pmatrix} \qquad (2)$$

Решение СЛАУ (2) для вычисления коэффициентов взаимовлияния определялось в среде Python при помощи функции np.linalg.lstsq (метод наименьших квадратов).

Обучив систему с помощью ретроспективного анализа динамических данных эксплуатации скважин, на основе вычисленных коэффициентов провели прогнозирование характера работы целевых скважин. Подход к определению весовых коэффициентов взаимовлияния был опробован на синтетических [2] и промысловых данных.

Рассматривался участок месторождения, состоящий из одной целевой добывающей скважины YY87 и двух возмущающих: нагнетательной скважины XX27 и добывающей скважины YY77. На рассматриваемом участке было проведено гидродинамическое исследование методом «Гидропрослушивания» (ГП) для оценивания гидродинамической связи между скважинами. Анализ результатов ГП показал наличие явной гидродинамической связи между скважинами YY87 и XX27.

Коэффициенты взаимовлияния, вычисленные методом MLR, представлены в таблице 1. Исходя из вычисленных коэффициентов можно утверждать, что модуль определил наличие взаимовлияния между скважинами YY87 и XX27. Таким образом, численный результат совпадает с результатом ГП.

На рис.1 представлены результаты численного моделирования методом MLR. Из графика видно, что кривая рассчитанного давления коррелирует (черная кривая) с исторической кривой (серая кривая) и повторяет ее динамику.

Таблица 1.

Скважины	β_{ij}
YY87 – XX27	0.98
YY87 – YY77	0.29

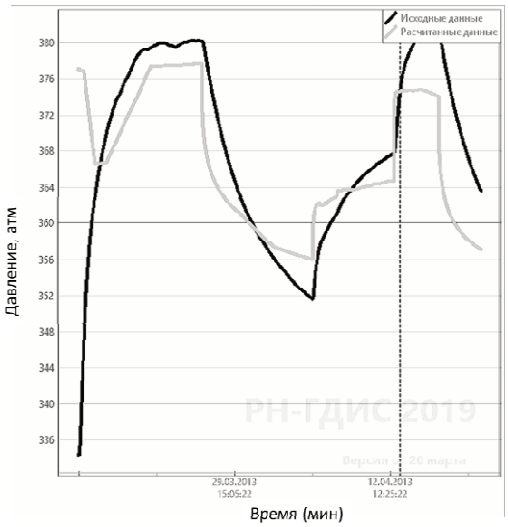


Рис.1 Динамика изменения давления на добывающей скважине/

На сегодняшний день проведен ряд тестов на различных объектах разработки, получено хорошее согласование численных данных с экспертной оценкой.

Список литературы

1. Dinh A. and Tiab D. «Inferring interwell connectivity from well bottomhole-pressure fluctuations in waterfloods». SPE Reservoir Evaluation and Engineering. P. 847–881. SPE 106881. October 2008.
2. Бухмастова С.В., Фахреева Р.Р., Питюк Ю.А. «Разработка инструмента для численного анализа взаимовлияния скважин»ю Российская нефтегазовая техническая конференция SPE: SPE-196848-RU. Октябрь 2019.

УДК 519.634

ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАТУХАНИЯ ИНДУЦИРОВАННОЙ ЛАЗЕРОМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В МЕТАЛЛЕ

Шепелев В.В.[1], Иногамов Н.А.[2], Фортова С.В.[1]

[1] Институт автоматизации проектирования РАН, Москва
[2] Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, Черноголовка, Московской обл.

e-mail: vadim.aries@gmail.com

Лазеры с ультракороткими импульсами имеют широкое промышленное применение, в особенности, в высокотехнологичных отраслях. Среди областей применения, интенсивно развивающихся в последние годы можно отметить такие технологии, как:

1. Упрочнение материалов с помощью лазерного воздействия, известное в зарубежной литературе как Laser Shock Peening (LSP) [1].
2. Формирование лазерным излучением наночастиц в коллоидных растворах вследствие лазерной абляции в жидкость (Laser Ablation in Liquid, LAL) [2].
3. Аддитивные технологии [3, 4].
4. Многочисленные методы лазерного структурирования поверхности облучаемого вещества. Известным примером формирующихся таким образом структур являются Laser-Induced Periodical Surface Structures (LIPSS) [5].

Помимо индустриальных областей, ультракороткие лазерные импульсы используются и в фундаментальных исследованиях, например, получении широкодиапазонных уравнений состояния (УРС) вещества в экстремальных состояниях и измерении напряжений конденсированной среды. Все эти области применения объединяет общий принцип: существенная часть лазерного воздействия вызывается сгенерированной в результате нагрева ударной волной.

В случае фемтосекундных импульсов с их высокой плотностью энергии излучения такая ударная волна имеет особенно большую амплитуду и острый профиль. При этом даже для узкой фокусировки линейный размер светового пятна существенно превышает толщину поверхностного слоя металла, в котором происходит поглощение излучения и формирование профиля индуцированной лазером ударной волны. Поэтому, в случае объемной мишени, сразу после поглощения излучения распространяющаяся ударная волна имеет плоский фронт. Но уже через несколько десятков пикосекунд (1 пс = 10^{-12} с) фронт волны становится близким к полусферическому.

Настоящий доклад посвящен теоретическому и численному исследованию изменения режима распространения волны с плоского на полусферическому. Внимание уделяется также распространению «крыльев» ударной волны на поверхности облученного металла в сторону от пятна нагрева. Характер распространения «крыльев» важен для экспериментальной диагностики процессов фемтосекундной лазерной абляции, поскольку позволяет по наблюдаемым поверхностным явлениям делать выводы о процессах, происходящих глубоко внутри мишени.

Представлены результаты гидродинамического численного моделирования, иллюстрирующие процесс смены режима распространения волны и ее дальнейшее затухание в мишени.

Список литературы

1. Y. Liao, C. Ye, G.J. Cheng, A review: Warm laser shock peening and related laser processing technique. Optics & Laser Technology. V. 78 A. 2016. P. 15–24.
2. E. Stratakis, M. Barberoglou, C. Fotakis, G. Viau, C. Garcia, G. A. Shafeev, Generation of Al nanoparticles via ablation of bulk Al in liquids with short laser pulses. Opt. Express. 2009. V. 17, 15. P. 12650–12659.
3. Leung, C.L.A., Marussi, S., Atwood, R.C., Towrie, M., Withers P.J. and Lee, P.D. In situ X-ray imaging of defect and molten pool dynamics in laser additive manufacturing. Nature Communications. 2018. V. 9. P. 1355.
4. Bertoli, U.S., MacDonald, B.E., Schoenung, J.M., Stability of cellular microstructure in laser powder bed fusion of 316L stainless steel. Materials Science and Engineering: A. V. 739. 2019. P. 109–117.
5. Bonse, J., Kruger, J., Hohm, S., Rosenfeld, A., Femtosecond laser-induced periodic surface structures, J. Laser Appl. 2012. 24. V. 4. P. 042006.

Работа авторов ВВС и СВФ выполнена в рамках госзадания ИАП РАН
Работа автора НАИ выполнена в рамках госзадания ИТФ РАН



СЕКЦИЯ 6
Методы и средства теплофизического и гидрогазодинамического эксперимента



УДК 532.529.6

ПРЕЦИЗИОННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ТОНКОЙ КАПЛИ, ИСПАРЯЮЩЕЙСЯ НА НАГРЕВАЕМОЙ ПОДЛОЖКЕ

Антоневич Я.В.[1,2], Зайцев Д.В.[1,2], Кабов О.А.[1,2]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
[2] Новосибирский государственный университет

e-mail: anton38v@gmail.com

Тенденция к повсеместной миниатюризации и бурное развитие микроэлектронных систем приводят к задаче по созданию высокоэффективных систем охлаждения, требующих существенной интенсификации процессов тепломассообмена. Большие надежды в решении данной задачи возлагаются на системы спрейного и микроструйного охлаждения, которые в настоящее время обеспечивают максимальный теплосъём с поверхностей, имитирующих чипы, до 45 МВт/м^2. В основе этих методов лежит процесс интенсификации тепломассопереноса в области контактной линии [1] лежащей капли при ее испарении. Но, несмотря на большой интерес к испарению капель, последние стадии этого процесса остаются крайне плохо изученными. Во многом это связано с отсутствием экспериментальных методик.

В данной работе разработана экспериментальная методика для исследования пространственно-временного распределения температуры на межфазных поверхностях тонкой лежащей капли (включая область контактной линии) при ее испарении на частично-смачиваемой нагреваемой подложке. Схема экспериментального стенда представлена на рис.1. Для получения трехмерной формы капли и распределения полей температур было рассмотрено совместное применение двух оптических методик – ИК-термографии и теневого метода. В качестве жидкости выбрана вода, поскольку она имеет высокий коэффициент поглощения в среднем ИК-диапазоне [2], что позволяет с большой точностью измерять температуру межфазной поверхности для достаточно толстых слоев жидкости. В области контактной линии капли, где метод ИК-термографии дает большую погрешность, температура измерялась системой пленочных микротерморезисторов (рис. 2). Для реконструкции трехмерной поверхности капли использовались изображения в двух ортогональных проекциях. Для определения 2D-контуров испаряющейся капли для теневых изображений (вид сбоку) использовался SPPF метод [3]. Для контура капли на термограмме использовался метод активных контуров (Snake approach) (вид сверху). Объем капли строился аппроксимирующими окружностями, плоскость которых параллельна плоскости изображения боковой камеры. При помощи аналитических весов проведена верификация теневого метода и показаны пределы его применимости. Капля окружена ИК-поглощающим кожухом. Внутренние стенки кожуха покрыты черной краской (Dupont Duco 71) с ε=0,98 в среднем ИК-диапазоне. Температура стенок поддерживается равной 20□. Кожух необходим для расчета отражений излучения окружающей среды от поверхности капли.

Обработка термограмм выполнена с учетом зависимости излучательной способности воды от угла наблюдения и отражения излучения от окружающей среды. Падающее излучение предполагалось неполяризованным. Для расчета излучения нагревателя и внутренних слоев капли была разработана математическая модель распространения теплового излучения в тонкой капле, лежащей на нагреваемой подложке. Разработанный алгоритм позволяет оценить вклад излучения нагревателя и внутренних слоев тонкой капли в сигнал, регистрируемый тепловизором.

В дальнейшем предполагается использовать полученное распределение в качестве граничных условий на поверхности капли для численного моделирования локального потока испарения с учетом неоднородности поля температур на межфазной границе.

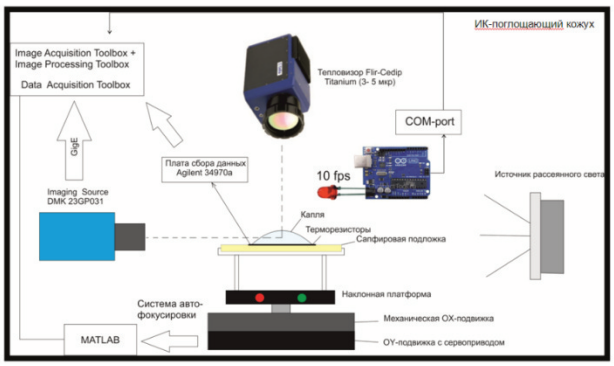


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

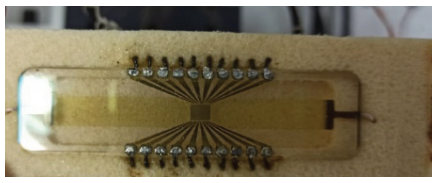


Рис. 2. Фото сапфировой подложки с микросенсорами.

Список литературы

1. Deegan R. D. et al. Contact line deposits in an evaporating drop // Physical review E. 2000. Т. 62. No. 1. P. 756.
2. Irvine W. M., Pollack J. B. Infrared optical properties of water and ice spheres // Icarus. 1968. Т. 8. No. 1–3. P. 324–360.
3. Chini S. F., Amirfazli A. A method for measuring contact angle of asymmetric and symmetric drops // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2011. Т. 388. No. 1–3. P. 29–37.

Работа поддержана РФФИ (грант №18-29-19197)

УДК 621.03

МЕТОД ФАЗОВОЙ ТРИАНГУЛЯЦИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ ГЕОМЕТРИИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОМЕХ

Двойнишников С.В., Рахманов В.В., Меледин В.Г., Садбаков О.Ю.

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

Совершенствование прецизионных методов бесконтактного измерения линейных размеров имеет огромное значение в развитии многих областей науки и техники [1-3]. Для бесконтактных измерений профиля поверхности трехмерных объектов наиболее перспективными и хорошо развитыми являются триангуляционные методы, использующие структурированное освещение. Они основаны на освещении структурированным светом поверхности объекта и наблюдении с направления, отличного от направления освещения. Наблюдаемое 2D изображение, представляющее собой пространственное распределение интенсивности рассеянного объектом света, содержит искажения, кодирующие информацию о третьей координате.

Научно-техническая проблема создания цифровых оптических методов измерений трехмерной геометрии крупногабаритных объектов, применимых в промышленности, в настоящее время не решена в полной мере. Существующие высокоточные измерительные системы требуют практически лабораторных условий использования, накладывают жесткие требования к светорассеивающим свойствам поверхности измеряемого объекта, ее трехмерному профилю и условиям внешнего освещения, в которых выполняются измерения [4]. К примеру, солнечный свет будет вносить динамические помехи в измерительный тракт, если выполнять измерения трехмерной геометрии крупногабаритных объектов в переменную облачную погоду. Это связано с тем, что солнечное излучение, рассеиваемое облаками, вносит трудно прогнозируемые помехи в наблюдаемое распределение интенсивности рассеиваемого излучения на поверхности измеряемого объекта. С другой стороны, измерения в промышленном помещении также усложняется влиянием динамических помех, обусловленных используемым искусственным освещением, характеристики которого, как правило, специально не изучаются [5]. Кроме того, в зависимости от перемещений изделий и оборудования в цехе, структура света, рассеиваемого на измеряемой поверхности, может кардинально изменяться. Это приводит к тому, что в зависимости от параметров структурированной засветки и характеристик внешнего освещения, влияние вносимых динамических помех может быть от пренебрежимо малых до существенных, делающих невозможным проведение измерений.

Целью данном работы является развитие оптических методов измерения трехмерной геометрии сложнопрофильных объектов на основе фазовой триангуляции для обеспечения прецизионных измерений в условиях динамических помех в виде нестационарного внешнего освещения характерного для промышленного производства.

В основе предлагаемого метода лежит использование избыточного количества экспериментальных данных от фотоприемников, управляемой пространственно-временной модуляции структурированного оптического источника и многомерного цифрового анализа экспериментальных данных.

В результате применения такого подхода, процесс измерения можно разбить на несколько частей: – оценка параметров внешнего освещения, наблюдаемого фотоприемником; – проведение измерений трехмерной геометрии; – контрольная проверка параметров внешнего освещения; – оценка погрешности измерений; принятие решения о необходимости дальнейших измерений; – расчет параметров пространственно-временной модуляции для последующего проведения измерений. Такой подход предполагает, что в процессе измерения и в процессе оценки параметров внешнего освещения, контролируемые параметры не будут изменяться. Если контрольная проверка параметров внешнего освещения покажет параметры, отличные от параметров, измеренных в процессе оценки перед проведением измерений, то проведенные измерения считаются недостоверными и требуется повторное проведение измерений.

В результате предложенный в рамках данной работы метод фазовой триангуляции для измерения трехмерной геометрии сложнопрофильных объектов позволяет проводить высокоточные измерения в условиях действующих промышленных технологий. Полученные технические решения отличаются универсальностью применения и могут быть применены для измерения геометрических параметров в широком спектре практических приложений в научных исследованиях и промышленных технологий.

Список литературы

1. Chugui Y.V. Three-dimensional optoelectronic measurement systems and laser technologies for scientific and industrial applications // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2015. V. 51(4). P. 385–397.
2. Meledin V.G. Informatics of optoelectronic measurements // Science and innovative industrial technologies. 2009. V. 18(2). P. 99–128.
3. Ryu Y.K., Cho H.S. New optical sensing system for obtaining the three-dimensional shape of specular objects // Opt. Eng. 1996. V. 35(5). P. 1483–1495.
4. Li X.-Q., Wang Z., Fu L.-H. A laser-based measuring system for online quality control of car engine block // Sensors (Switzerland). 2016. V. 16(11). P. 1877.
5. Cavedo F., Norgia M., Pesatori A., Solari G.E. Steel Pipe Measurement System Based on Laser Rangefinder // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2016. V. 65(6). P. 1472–1477.

Обзорная часть работы выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН. Аналитическая часть работы выполнена в рамках проекта РФФИ 18-08-00910. Результаты математического моделирования получены в рамках проекта МД.1767.2020.8.

УДК 621.03

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ МЕТОДА МНОГОРАКУРСНОЙ ФАЗОВОЙ ТРИАНГУЛЯЦИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ ГЕОМЕТРИИ ВЫПУКЛЫХ И ПРОТЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Двойнишников С.В., Чубов А.С., Павлов В.А., Бакакин Г.В.

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

Совершенствование методов трехмерной диагностики сложнопрофильных объектов актуально для энергетических технологий из-за повышающихся требований к геометрической точности элементов энергетических систем [1-3].

При измерениях трехмерной геометрии сложнопрофильных выпусклых и протыженных объектов методами фазовой триангуляции [4] обеспечить измерение всей поверхности объекта затруднительно. Для решения данной проблемы применяют многоракурсные методы измерения трехмерной геометрии.

В основном, все известные решения можно свести к методам, предусматривающим использование специальных маркеров для привязки различных измеренных фрагментов в итоговой трехмерной модели; методам, предусматривающим вращение измеряемого объекта на заранее известный угол; методам, предусматривающим вращение элементов оптической системы; методам, использующим пространственные кросс-корреляционные алгоритмы для определения параметров совмещения фрагментов измеренной поверхности.

Методы с использованием маркеров обладают довольно низкой точностью совмещения измеренных фрагментов, ограниченной количеством используемых маркеров и качеством их изготовления. Кроме того, у экспериментаторов нет возможности использовать очень большое количество маркеров, так как с ростом их количества на измеряемой поверхности снижается качество измеренной трехмерной модели. Тем не менее, достоинством данного метода является инвариантность к форме и текстуре поверхности измеряемого объекта.

Развитием метода с использованием маркеров является метод многоракурсных измерений с использованием световых маркеров [5]. Суть метода сводится к совмещению измеренных фрагментов поверхности измеренного объекта по маркерам, которые не нанесены не посредственно на поверхность объекта, а засвечивают локальные области поверхности, которые должны быть однозначно различимы с обоих ракурсов измерения. Такой подход является более универсальным, чем использование классических маркеров, однако требует дополнительного распознавания координат подсвеченных маркером на поверхности объекта.

В рамках данной работы был применен многоракурсный метод фазовой триангуляции, позволяющий выполнять сшивку измеренных областей, опираясь на информацию о локальных параметрах засветки на поверхности измеряемого объекта. Суть метода заключается в следующем. Используется два фотоприемника, положение которых друг относительно друга зафиксировано и один источник структурированной засветки. Измерение трехмерной геометрии выполняется последовательно, при этом на каждом шаге измеряется фрагмент поверхности. Измерение выполняется на основе принципа стереопары с помощью двух фотоприемников, причем в качестве анализируемой текстуры используется структурированная засветка, генерируемая источником оптического излучения. В результате обеспечивается максимально высокое разрешение текстуры и минимизируется погрешность измерения.

Совмещение измеренных фрагментов выполняется аналогично методу опорных маркеров на измеряемой поверхности [5]. Отличие заключается в том, что маркерами выступают параметры структурированной засветки, наблюдаемые фотоприемниками в каждой точке на измеряемой поверхности. Такой подход обеспечивает минимизацию ошибки совмещения при измерении трехмерной геометрии протяженных и выпуклых объектов.

Цель данной работы заключается в оценке погрешности метода многоракурсной фазовой триангуляции при реализации процедуры сшивки фрагментов, измеренных с различных ракурсов.

В рамках работы выполнены теоретические оценки погрешности измерения и представлены результаты математического моделирования.

В результате, в работе показано, что представленный метод многоракурсной фазовой триангуляции для измерения трехмерной геометрии выпуклых и протяженных объектов обеспечивает необходимый уровень точности измерений и может использоваться для получения трехмерной геометрии сложнопрофильных выпуклых и протяженных объектов в условиях промышленности.

Список литературы

1. Двойнишников С.В., Куликов Д.В., Меледин В.Г. Оптоэлектронный метод бесконтактного восстановления профиля поверхности трехмерных объектов сложной формы // Метрология. 2010. №4. С. 15–27.
2. Куликов Д.В., Аникин Ю.А., Двойнишников С.В., Меледин В.Г. Лазерная технология определения геометрии ротора под нагрузкой // Электрические станции. 2010. №7. С. 39–43.
3. Двойнишников С.В., Меледин В.Г., Шпольвинд К.В. Метод компенсации нелинейности тракта источник–приемник оптического излучения при 3D-измерениях на основе фазовой триангуляции / Измерительная техника». ISSN 0368-1025. 2012. №2. С. 12–16.
4. Двойнишников С.В., Меледин В.Г., Павлов В.А. Высокоскоростная обработка фазовых изображений с использованием параллельных вычислений // Автометрия. 2017. Т. 53. №2. С. 56–62.
5. Двойнишников С.В., Меледин В.Г., Щепихин И.В., Кабардин И.К., Куликов Д.В. Способ измерения трехмерной геометрии выпусклых и протяженных объектов // Патент РФ №2708940, приоритет от 15.01.2019.

Обзорная часть работы выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.
Аналитическая часть работы выполнена в рамках проекта РФФИ 18-08-00910.
Результаты математического модулирования получены в рамках проекта МД 1767.2020.8.

УДК 533.6.071.082.5

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ОБТЕКАНИЯ МОДЕЛИ СВЕРХЗВУКОВОГО ПАССАЖИРСКОГО САМОЛЁТА НА РАКЕТНОМ ТРЕКЕ ГКНИПАС

Иншаков С.И., Кудрявцева Е.Д.

ФГУП Центральный аэрогидродинамический институт ЦАГИ им. профессора Н.Е. Жуковского, г. Жуковский, Московская область

e-mail: mera@tsagi.ru

В работе представлены результаты визуализации обтекания модели сверхзвукового пассажирского самолёта (СПС) на ракетной дорожке ГкНИПАС теневым фоновым методом (ТФМ, BOS) [1],[2],[3]. Регистрация изображений осуществлялась с помощью скоростной камеры Memrecam HX-3, в качестве фона был лес, отстоящий от трассы на 100 м, сама камера находилась на расстоянии 60 м от трассы. Эксперимент проходил при естественном освещении модели дневным светом (см. рис 1).

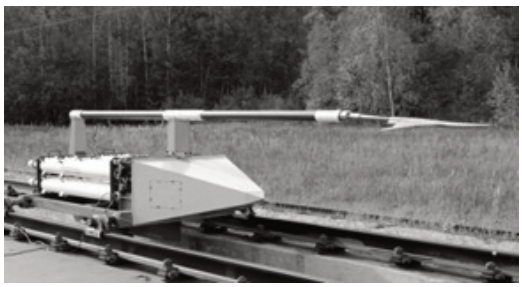


Рис 1 Модель СПС на ракетной тележке.

Обработка изображений проводилась тремя алгоритмами: с помощью с помощью методики НИИЭФ (г. Саров) (см. рис 2)

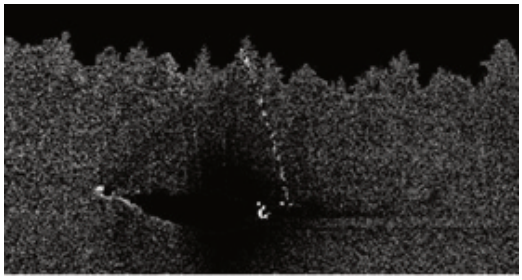


Рис 2. Обработка методикой НИИЭФ.

Результаты обработки программой Optical Path [4], [5], [6] представлены на рисунке 3

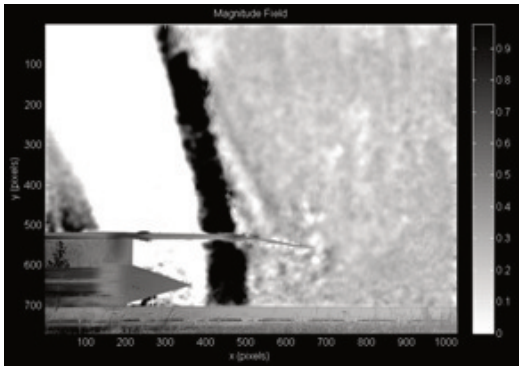


Рис 3 Обработка программой Optical Path [6].

Результаты обработки программой PIVVIEW, использующей кросскорреляционный анализ (см. рис 4)

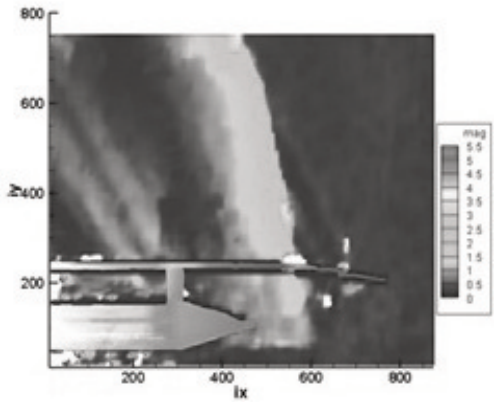


Рис 4 Результаты обработки программой PIVVIEW.

Показано, что в данном случае наиболее оптимальным алгоритмом является Optical Path. Определены пути дальнейшей адаптации ТФМ метода к испытаниям на ракетном треке.

Список литературы

1. Gary S. Settles Schlieren and Shadowgraph Im-aging in the Great Outdoors, Proceedings of PSFVIP-2. May 16–19, 1999. Honolulu. USA.
2. Meier G. E. A. Computerized background-oriented schlieren // Experiments in Fluids. 2002. V. 33. P. 181–187.
3. Weinstein L. M., Large-field schlieren visualiza-tion from wind tunnel to flight, Proceedings of VSJ-SPIE98. December 6–9, 1998. Yokohama. Japan.
4. Smith N.T., Heineck J.T., Schairer E.T. Optical Flow for Flight and Wind Tunnel Background Oriented Schlieren Imaging. AIAA SciTech Forum and Exposi-tion. January 09–13, 2017. Grapevine. TX. USA.
5. Пономарев Е.С., Григорьев А.С. Алгоритмы вычисления оптического потока в задаче определе-ния собственного движения. «Информационные технологии и системы 2015». 39-я междисциплинарная школа-конференция, 7–11 сентября 2015. Олимпийская деревня, Сочи, Россия.
6. Tianshu Liu. Open Optical Flow Manual. 2017.

УДК 532.516

ИСПЫТАНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ДОПЛЕРОВСКОГО ЛАД-08С НА ВТОРИЧНОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ ЭТАЛОНЕ ЕДИНИЦЫ СКОРОСТИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

Кабардин И.К.[1], Меледин В.Г.[1], Двойнишников С.В.[1], Павлов В.А.[1], Бакакин Г.В.[1], Мошаров В.Е.[2], Самойленко А.И.[2], Иншаков С.И.[2]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
[2] ФГУП Центральный аэрогидродинамический институт ЦАГИ им. профессора Н.Е. Жуковского, г. Жуковский, Московская область

В области фундаментальной метрологии и обеспечения единства средств измерений роль оптико-информационных методов, систем и технологий бесконтактной диагностики динамических процессов чрезвычайно актуальна. Первичные эталоны – это метрологическая база современной технологической цивилизации, наличие которой определяет принадлежность стран к группе промышленно развитых. Для обеспечения научных исследований и обеспечения измерений скорости воздушного потока в промышленности в России эксплуатируется очень большой парк рабочих средств измерений – порядка 500 тыс. шт. В связи с ростом внимания к вопросам повышения эффективности и безопасности в энергетике, промышленности и на транспорте, к экологическим проблемам потребность в средствах измерения скорости воздушного потока неуклонно возрастает. В Государственных региональных центрах стандартизации, метрологии и испытаний Госстандарта эксплуатируется более 20 эталонных аэродинамических установок для поверки РСИ. Вторичные эталоны: эталон-копия находится в ФГУП «ЦАГИ им. профессора Н.Е. Жуковского», и набор эталонных СИ находится в ФБГУ «ГГО им. А.И. Воейкова» [1].

На государственном вторичном эталоне единицы скорости воздушного потока во НИО-7 ФГУП ЦАГИ Установке аэродинамической измерительной ЭМС 0.05/100 проведены испытания Лазерного измерителя доплеровского ЛАД-08С.

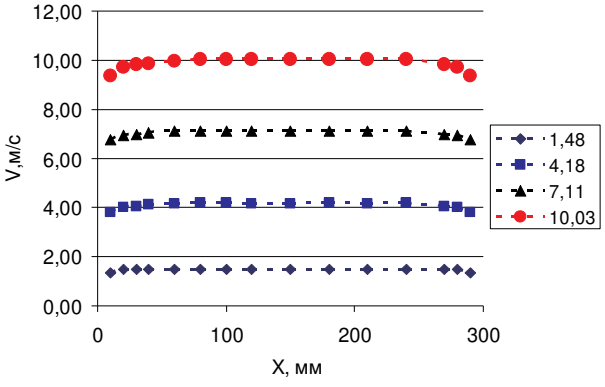


Рис. 1. Профиль среднего значения осевой компоненты скорости.

Целью испытаний являлась проверка технических возможностей измерительной системы на вторичном эталоне единицы скорости воздушного потока путем измерения профилей скорости воздушного потока в измерительной секции государственного вторичного эталона единицы воздушного потока в диапазоне удаления 10–290 мм от внутренней поверхности иллюминатора при скоростях аэродинамического потока в диапазоне от 1.34 до 10.03 м/с при времени накопления в измерительной течке не превышающей 60 с и количестве измерений в точке не превышающего 4000.

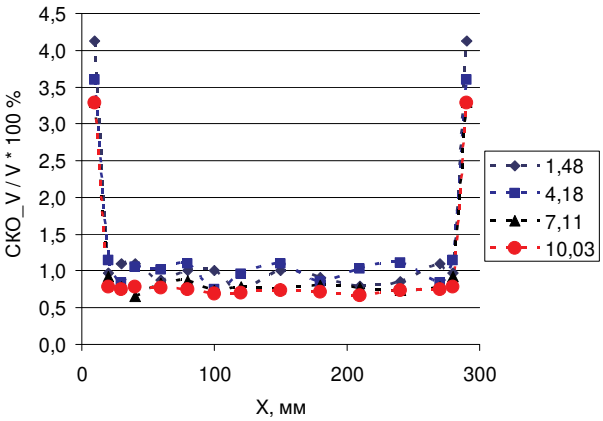


Рис. 2. Профиль относительной погрешности измерения среднего значения осевой компоненты скорости.

Проведены измерения профилей осевой компоненты скорости в диапазоне 10–240 мм от внутренней поверхности иллюминатора государственного вторичного эталона единицы скорости воздушного потока вторичного при значении скорости в ядре потока 1.48 м/с, 4.18 м/с, 7.11 м/с, 10.03 м/с (рис. 1). Относительная погрешность измерения среднего значений осевой компоненты скорости в измерительной точке 10 мм не превышала 4.1% (рис.2). В диапазоне удаления от иллюминатора 20-290 мм относительная погрешность измерения среднего значений осевой компоненты скорости не превышала 1.1% [2].

Список литературы

1. Меледин В.Г. Информационная оптоэлектронная диагностика: Наука и инновационные промышленные технологии. Новосибирск: Издательство «Академиздат». 2015. 142 с.
2. Акт испытаний №1 от 28.12.2019 НИО-7 ФГУП ЦАГИ.

Экспериментальное исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН (АААА-А18-118051690120-2), исследование функций измерительного комплекса выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 18-31-20036).

УДК 621.9

ИСПЫТАНИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЛАЗЕРНОГО ДОПЛЕРОВСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ СКОРОСТИ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА С ОБРАЗОВАНИЕМ БРЫЗГ В РАМКАХ ЛАБОРАТОРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЕТРОВОЛНОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Кабардин И.К.[1], Меледин В.Г.[1], Двойнишников С.В[1], Троицкая Ю.И.[2], Кандауров А.А.[2], Сергеев Д.А.[2]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
[2] Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Морской аэрозоль является важным фактором атмосферного пограничного слоя над поверхностью океана. Сложности прямых измерений в условиях урагана приводят к необходимости лабораторных измерений [1]. Детальные исследования образования брызг проведены в условиях лабораторных экспериментов на Ветроволновом теромостратифицированном бассейне (ВВТСБ) Института прикладной физики РАН [2]. Для измерения кинематических характеристик потока аэрозоля использован современный бесконтактный оптический метод диагностики двухфазных потоков – метод лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА). Измеритель ЛАД-08 на основе метода ЛДА разработан и произведен в Институте теплофизики СО РАН в г. Новосибирске. Оптическая схема измерителя скорости содержит лазер, два ортогонально ориентированных акустооптических модулятора бегущей волны, приемо-передающую оптическую систему, состоящую из последовательно расположенных зеркал и объективов и фотоэлектронный умножитель. К фотоприемнику подключен двухканальный доплеровский сигнальный процессор, который передает обработанные данные в компьютер. Сканирование измерительного объема осуществляется путем перемещения оптического блока координатно-позиционирующим устройством. Измеритель работает следующим образом. Луч лазера после прохождения элементов направляется на акустооптический коммутатор-модулятор. Под действием модулирующего напряжения на выходе модулятора формируются два световых пучка, дифрагированных в нулевой и минус первый порядки. Расщепленные пучки проходят последовательно через систему оптических элементов и направляются объективом в исследуемую область потока. Пересекаясь в потоке, лазерные пучки образуют интерференционную картину с известной пространственно-временной периодической структурой. При пересечении рассеивающей частицей зондирующего оптического поля на выходе фотоприемника появляется радиоимпульс фототока, доплеровская частота, которого есть известная линейная функция скорости, а длительность равна времени прохождения частицы измерительный объем. Измеритель позволяет измерить две проекции вектора скорости в диапазоне 0.001–400 м/с с относительной погрешностью, не превышающей 0.1%. Размер измерительной зоны составляет 0.1×0.1×0.5 мм. Позиционирующее устройство позволяет перемещать измерительный блок в области 250×250×250 мм с точностью 0.1 мм. Данный метод также обеспечивает возможность измерения локальных пульсаций скорости потока [3].

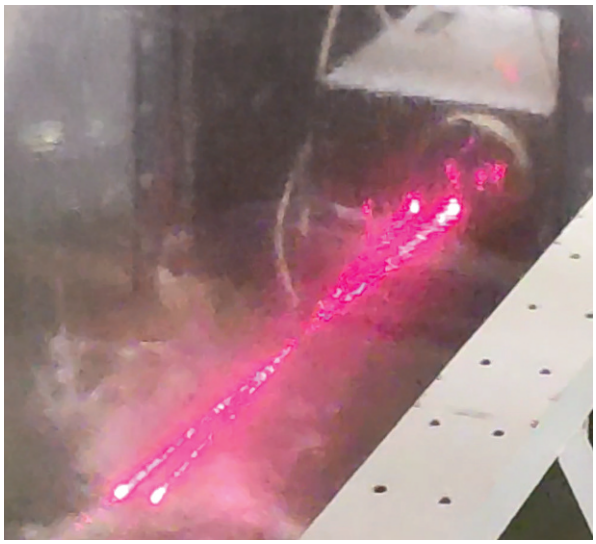


Рис. 1. Измерение скорости брызг лазерным измерителем доплеровским ЛАД-08 в ветроволновом канале (ВВК) ИПФ РАН.

Проведены предварительные эксперименты по измерению скорости капель аэрозоля лазерным измерителем доплеровским ЛАД-08 на ветроволновом канале (ВВК) ИПФ РАН. Показано что измерительная система позволяет измерять все три компоненты скорости аэродинамического потока при скорости ветра от 10 до 45 м/с. Показана возможность диагностики скорости ветра при добавлении в поток частиц дыма.

Список литературы

1. Troitskaya, Yu.I. Laboratory and theoretical modeling of air-sea momentum transfer under severe wind conditions / Troitskaya Yu.I., Sergeev D.A., Kandaurov A.A., Baidakov G.A., Vdovin M.A. and Kazakov V.I. // Geophys J. Res. Ocean. 2012. V. 117. P. Ñ00J21.
2. Troitskaya, Y. Bag-breakup fragmentation as the dominant mechanism of sea-spray production in high winds / Kandaurov A., Ermakova O., Kozlov D., Sergeev D. and S. Zilitinkevich // Sci. Rep. 2017. V. 7. P. 1614.
3. Меледин В.Г. Информационная оптоэлектронная диагностика: Наука и инновационные промышленные технологии. Новосибирск: Издательство «Академиздат». 2015. 142 с.

Экспериментальное исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН (АААА-А18-118051690120-2), исследование функций измерительного комплекса выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 18-31-20036).

УДК 621.9

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ ПРИМЕНИМОСТИ МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ СПАЛАРТА-АЛМАРЕСА И МОДЕЛИ ПЕРЕНОСА РЕЙНОЛЬДСОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ПОВОРОТНО-ДИВЕРГЕНТНЫМ ПОТОКОМ

Кабардин И.К.[1], Яворский Н.И.[1], Меледин В.Г.[1], Правдина М.Х.[1], Гордиенко М.Р.[1], Езендеева Д.П.[1], Какаулин С.В.[1], Усов Э.В.[2], Климонов И.А.[2]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
[2] Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Научная проблема такого рода возникает в химии и катализе, в механике при оптимизации массопереноса за счет управления потоком. Эффективность массопереноса обусловлена равномерностью полей скорости и мелкомасштабной турбулентности в реагирующем потоке. Потоки реагентов в реальных установках и реакторах работают в условиях сложной геометрии с поворачивающими и расширяющимися участками, в которых формируются пристенные струи, происходят отрывы и присоединения потока, формируются зоны возвратного течения. Подобные эффекты увеличивают гидродинамическое сопротивление потока и ухудшают равномерность турбулентного массопереноса. При численном моделировании таких явлений требуется верификация и модернизация моделей турбулентности для адекватного описания массопереноса.

В работе проведен анализ характеристик турбулентного массопереноса в поворотно-дивергентном течении при управлении потоком с возможностью формирования различной интенсивности турбулентности набегающего потока. Расход газа изменялся в диапазоне 50-250 н. м3/ч. При диагностике характеристик турбулентного массопереноса применен метод лазерной доплеровской анемометрии. Проведена верификация численных расчетов методами вычислительной гидродинамики по результатам экспериментальных исследований. При численном моделировании поворотно-дивергентного течения использованы различные модели турбулентности с рекомендованными диапазонами параметров, лежащими в границах применимости для данного типа течения [1]. Моделирование основано на применении полуэмпирических моделей турбулентности на основе уравнений Навье-Стокса осредненных по Рейнольдсу и метода моделирования крупных вихрей. Среда считается несжимаемой и изотермической. Для замыкания осредненных уравнений использованы полуэмпирические модели турбулентности: модель Спаларта-Аллмарэса [2] и модель переноса Рейнольдсовых напряжений [3]. Анализ результатов численного моделирования показал формирование ярко выраженной пристенной струи в поворотно-дивергентном течении и формирование зон возвратного течения.

Верификация численного моделирования выполнена на основе измерений кинетических параметров методом лазерной доплеровской анемометрии. Она показала, что в отсутствии управляющих лопаток обе модели турбулентности адекватно моделируют поворотно-дивергентное течение только до формирования отрывов потока и образования зон возвратного течения. При управлении потоком с привлечением поворачивающих лопаток уменьшается образование зоны возвратного течения на повороте и профиль скорости в месте после поворота становится более равномерным.

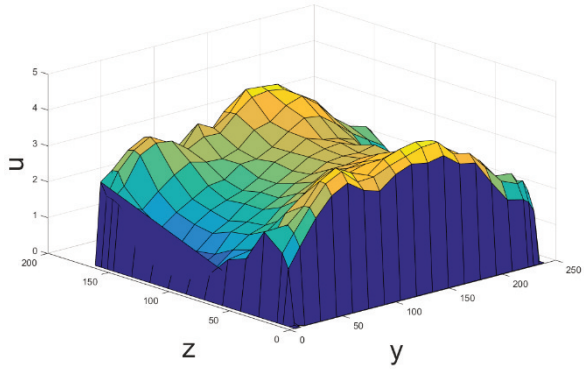


Рис. 1. Значение величины зоны рециркуляции после поворотного устройства при различных значениях расхода.

Сравнение результатов расчета и эксперимента показали, что модель переноса Рейнольдсовых напряжений более адекватно описывает течение чем модель турбулентности Спалларта-Алмареса

Список литературы

1. Versteeg H.K., Malalasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. The Fi-nite Volume Method. Longman Scientific and Technical. 1995. 257 p.
2. Spalart P.R., Allmaras S.R. A one-equation turbulence model for aerodynamics flows // La Recherche Aerospatiale. 1994. V. 1. P. 5–21.
3. Launder B.E., Spalding D.B. The Numerical Computation of Turbulent Flows // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1974. V. 3. P. 269–289.

Экспериментальное исследование кинематических свойств потока выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН (АААА-А18-118051690120-2).
Исследование границ применимости моделей турбулентности выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 18-31-20036).

УДК 533.6.011.8

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ДОЗВУКОВЫХ СТРУЯХ ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНОГО ВОЗДУХА ВЧ-ПЛАЗМОТРОНА ВГУ-4

Колесников А.Ф.[1], Щелоков С.Л.[2]

[1] Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва
[2] Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва

e-mail: koles@ipmnet.ru, schelokov.s.99@gmail.com

В лабораторных высокоэнтальпийных установках невозможно полностью моделировать натурные условия нагрева поверхности тела при входе в атмосферу, однако возможно локальное моделирование условий теплопередачи от пограничного слоя к критической точке на поверхности. Для такого локального моделирования необходимо выполнение трех условий [1]: 1) давление торможения в струе плазмотрона равно давлению торможения p_0 в критической точке на поверхности тела; 2) энтальпия h_e на оси струи на внешней границе пограничного слоя перед моделью равна полной энтальпии в натурных условиях; 3) равны градиенты скорости β на внешних границах пограничного слоев перед моделью и телом.

Широкие возможности для реализации этих условий в дозвуковых струях высокоэнтальпийного воздуха предоставляет 100-киловаттный ВЧ-плазмотрон ВГУ-4 (ИПМех РАН) [2]. Полную энтальпию и давление торможения можно плавно регулировать в диапазонах 5 – 50 МДж/кг и 0.02 – 1 атм. При фиксированных значениях мощности ВЧ-генератора и давления в барокамере градиент скорости можно варьировать за счет изменений геометрии разрядного канала и формы моделей. При реализации условий моделирования [1] в эксперименте на ВГУ-4 необходимо учитывать, что в этой установке энтальпия, давление торможения и скорость дозвукового потока высокоэнтальпийного воздуха находятся в функциональной связи [2].

В [3] проведено экспериментальное и численное исследование теплообмена дозвуковых струй высокоэнтальпйного воздуха в ВЧ-плазмотроне ВГУ-4 при давлении 100 гПа, расходе воздуха 2.4 г/с в диапазоне мощности ВЧ-генератора 20–75 кВт для трех вариантов секционированного разрядного канала с диаметром выходного сечения конического сопла 30, 40 и 50 мм. По измеренным тепловым потокам к водоохлаждаемой цилиндрической модели из меди с плоским торцом диаметром 20 мм и скоростным напорам численно восстановлены энтальпия на внешней границе пограничного слоя около модели h_e и характерная скорость на оси струи V_S в зависимости от мощности ВЧ-генератора [3].

В настоящей работе на основе данных [3] установлены однозначные линейные зависимости V_S от h_e для трех конфигураций разрядного канала с тремя коническими соплами. В результате анализа большого объема экспериментальных данных предложена универсальная аппроксимация скорости V_S, как многопараметрической функции от энтальпии от h_e, давления в барокамере p_S и диаметра сопла D.

С использованием этой универсальной корреляции и условий моделирования [1] определена область в координатах «энтальпия – давление торможения» и соответственно границы скорости и высоты входа, для которых возможно локальное моделирование теплопередачи к критической точке тела с радиусом затупления носка 1 м при применении цилиндрических моделей с плоским носком диаметра 20-140 мм. Определен участок траектории входа в атмосферу экспериментального аппарата IXV [4], для которого возможно моделирование конвективного нагрева окрестности носка на ВЧ-плазмотроне ВГУ-4 в дозвуковых струях высокоэнтальпийного воздуха (см. рис).

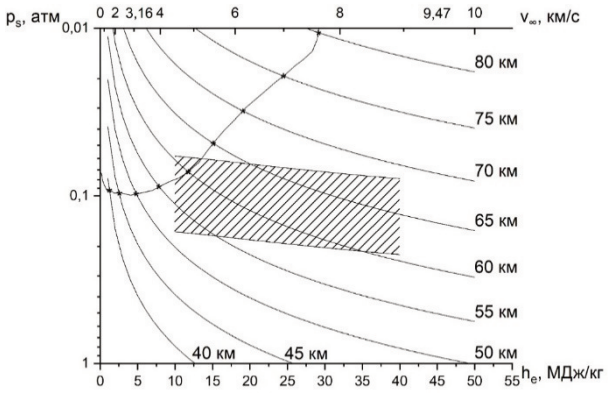


Рис. 1. Область моделирования теплообмена на ВГУ-4 (заштрихована) и траектория аппарата IXV.

Список литературы

1. Колесников А.Ф. Условия моделирования в дозвуковых течениях теплопередачи от высокоэнтальпийного потока к критической точке затупленного тела // Изв. РАН. МЖГ. 1993. № 1. С. 172–180.
2. Васильевский С.А., Гордеев А.Н., Колесников А.Ф. Локальное моделирование аэродинамического нагрева поверхности затупленного тела в дозвуковых высокоэнтальпийных потоках воздуха: теория и эксперимент на ВЧ-плазмотроне // Изв. РАН. МЖГ. 2017. №1. С. 160–167.
3. Колесников А.Ф., Гордеев А.Н., Васильевский С.А., Тептеева Е.С. Влияние геометрии разрядного канала ВЧ-плазмотрона на теплообмен в высокоэнтальпийных дозвуковых струях воздуха // ТВТ. 2019. Т. 57. № 4. С. 509–517.
4. A.Viviani, G.Pezzella. Aerodynamic and Aerothermodynamic Analysis of Space Mission Vehicles. Springer Aerospace Technology. 2015. 898 p.

Работа выполнена в рамках Госзадания № АААА-А20-120011690135-5 при частичной поддержке РФФИ (грант 19-01-00056).

УДК 621.184.44

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ ПАРА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПАРОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

Крылов В.С.[1,2], Птахин А.В.[1,2,3], Кондратьев А.В.[1,2,3]

[1] ЗАО НПВП «Турбокон», Калуга
[2] Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского
[3] Московский государственный университет им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал

e-mail: turbocon@kaluga.ru

Возможность создания высокотемпературной паротурбинной установки с перегревом пара после парогенератора напрямую связана с работой конденсатора, содержащего большое (до 15–20% по массе) количества неконденсирующихся газов. Конструкции современных конденсационных установок не позволяют эффективно работать при большом содержании неконденсирующихся газов. Конструкция современных конденсаторных установок со своей компоновкой трубного пучка не могут обеспечить высокий коэффициент теплоотдачи и массообмена от парогазовой смеси к стенке на фоне роста концентрации газов по мере уменьшения конденсации пара. Расчет такого устройства не имеет методической базы и надежных экспериментальных данных для определения коэффициента теплопередачи и массообмена.

Процесс конденсации пара на горизонтальных пучках труб широко распространен на практике и является неотъемлемой частью теплогидродинамических процессов протекающих на действующих установках ТЭС и АЭС.

Описание методики расчета При детальном изучение процесса конденсации парогазовой смеси на специализированном стенде, были получены результаты, которые согласуются с формулой Бермана [1], в которой используется параметр:

$$П = \frac{\rho_г \cdot \omega_г^2}{\rho_к \cdot g \cdot d_н} \qquad (1)$$

где $\rho_{г,к}$ – плотность смеси и конденсата пара соответственно, $\omega_г$ – скорость смеси, $d_н$ – наружный диаметр трубок.

Полученные данные, взяв за основу на формулу Л.Д. Бермана [2] можно в первом приближении аппроксимировать следующим уравнением, обобщающим результаты экспериментов с различными значениями параметра П в диапазоне 0,03–0,26 (рисунок 1):

$$\frac{\alpha}{\alpha_{Nu}} = 28.3П^{0.08} Nu_w^{-0.58} \left(1+245П\right)^{0,33} e^{-11\nu П^{0.35}-0,84} \qquad (2)$$

где α – коэффициент теплоотдачи от пара, α_{Nu} – коэффициент теплоотдачи от неподвижного чистого пара, Nu_w – число Нуссельта воды, ν – объемная доля воздуха в паре.

Уравнение (2) было применено для определения коэффициента теплоотдачи натурной секции высокоэффективного конденсатора пара. После чего определялся коэффициента теплопередачи как величина обратная сумме термических сопротивлений на пути пар-вода. Сопоставление экспериментальных данных и методики расчета иллюстрированы на рисунке 2.

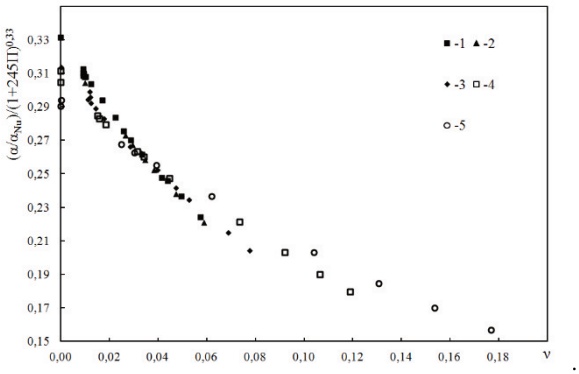


Рис. 1. Обобщение опытных данных по конденсации пара из движущейся паровоздушной смеси. Параметр П: 1 – 0,24-0,26; 2 – 0,23-0,25; 3 – 0,15-0,16; 4 – 0,07-0,09; 5 – 0,03-0,04.

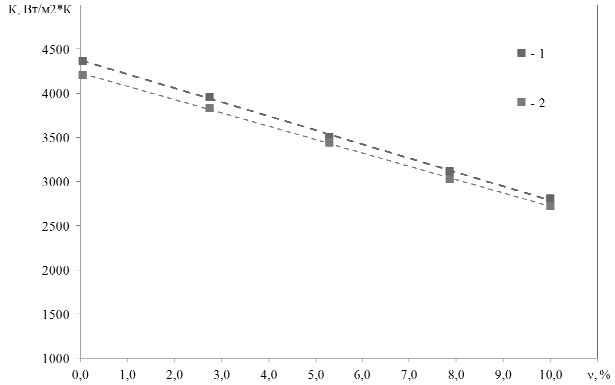


Рис. 2. Сопоставление результатов эксперимента и методики расчета:1 – Экспериментальные данные секции высокоэффективного конденсатора; 2 – Расчет по методике расчета высокоэффективного конденсатора пара.

Полученная зависимость позволяет выполнить инженерный расчет высокоэффективных конденсаторов пара с содержание неконденсирующихся газов.

Проведены лабораторные и натурные экспериментальные исследования процесса конденсации пара из парогазовой смеси.

Список литературы

1. Мильман О.О., Федоров В.А. Воздушно-конденсационные установки. М.: Изд. МЭИ. 2002. 208 с.
2. Milman O.O., Krylov V.S., Ptakhin A.V., Kondratev A.V., Yankov G.G. High-efficiency condenser of steam from a steam-gas mixture // Thermal Engineering. 2017. V. 65. No. 12. P. 71–77.

Работа поддержана РНФ (грант № 17-19-01604)

УДК 532.527.2, 620.92

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГЕНЕРАЦИИ ТЕПЛА В МНОГОЩЕЛЕВОМ ПРОСТРАНСТВЕ КРУГОВОЙ СИСТЕМЫ КУЭТТА-ТЕЙЛОРА

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

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

e-mail: nikerx@gmail.com

Рассматриваемый в работе исследовательский стенд “Многоцилиндровый тепловой генератор” относится к теплогенераторам, преобразующим энергию ветра в тепловую [1]. Установка предназначена для исследования процесса выделения тепла в кольцевых каналах, а также исследования структуры течений Куэтта – Тейлора и может применяться в качестве автономной системы отопления, горячего водоснабжения, сепаратора жидкостей.

Принцип действия теплового генератора заключается в нагреве теплоносителя за счет сил трения высоковязкой жидкости в цилиндрических каналах теплогенератора при вращении роторов навстречу друг другу. При этом эффективность выделения тепла зависит от вязкости рабочей жидкости, скорости вращения роторов, геометрических параметров кольцевых каналов, а также от режима течения в зазоре.

Кольцевое течение в щелевом пространстве между двумя вращающимися цилиндрами привлекает исследователей сложностью протекающих процессов и сложностью математического моделирования и постановки эксперимента. Структура течения в зазорах между вращающимися коаксиальными цилиндрами определяется соотношением между числами Рейнольдса внешнего и внутреннего цилиндров. В обзорной работе [2] приведен анализ процессов в коаксиальном однощелевом канале, образованном двумя независимо вращающимися цилиндрами. В частности, для встречно и спутно вращающихся цилиндров построена карта режимов течения и установлена иерархия этих режимов в зависимости от соотношений чисел Рейнольдса для внутреннего и внешнего цилиндров.

Теплоотдача между цилиндрами исследовалась в гораздо меньшей степени и в этой проблеме осталось много неизученных вопросов. Особенно слабо изученным является процесс диссипативного нагрева жидкости в кольцевом промежутке между вращающимися цилиндрами [3].

Целью исследования является получение экспериментальных данных о влиянии геометрических параметров многощелевого варианта модели теплового генератора, вязкости жидкости и частоты вращения роторов на диссипативные процессы. Данной теме посвящено не так много работ, и все они выполнены, в основном, при исследовании однощелевых систем.

Оборудование и методы измерений, используемые при работе экспериментальной установки, позволяют исследовать влияние параметров рабочей жидкости и относительной угловой скорости вращения роторов на выделяемую теплогенератором мощность. В частности, установка оснащена двухканальной динамометрической системой регистрации момента силы сопротивления вращению роторов теплогенератора, что позволяет измерять развиваемую генератором тепловую мощность.

Проверка метода осуществлялась по измерению тепловой энергии, определенной по разности энтальпий рабочей жидкости на входе и выходе теплогенератора и расходу этой жидкости. Было показано, что результаты измерений, полученные двумя независимыми методами, совпадают с хорошей степенью точности [4].

Известно, что классическое круговое течение Куэтта-Тейлора при малых значениях числа Рейнольдса Re имеет ламинарный характер, а с ростом параметра Re теряет устойчивость и структура его существенно усложняется [2]. В этом случае существование в кольцевом зазоре сложной иерархии вихревых структур можно обнаружить по поведению мгновенного значения момента сопротивления вращению цилиндров системы Куэтта-Тейлора. Данные, полученные созданной системой измерения, дают информацию о спектре генерируемых пульсаций момента в жидкости одновременно во всех щелевых каналах. Созданная информационно-измерительная система и методика спектрального анализа пульсаций течения в многощелевом пространстве позволили исследовать связь процесса возникновения пульсаций с числом Рейнольдса через данные о вязкости и сопоставить полученные данные с подобными процессами в однощелевом варианте ранее исследованного Тейлором кольцевого течения.

Использование представленных в работе экспериментальных методов исследования и измерительного оборудования может дать большой объем информации, как для понимания гидродинамических и тепловых процессов, происходящих в мультицилиндровых системах Куэтта-Тейлора, так и для практического применения таких систем как источников тепловой энергии.

Список литературы

1. Serov A.F., Mamonov V.N., Terekhov V.I., Nazarov A.D. Patent for Invention “Opposite wind-head Generator”. №2612237.03. 2017.
2. Andereck C.D., Liu S.S. and Swinney H.L. Flow regimes in a circular Couette system with independently rotating cylinders // J. Fluid Mech. 1986. Vo 164. P. 155–183.
3. Coelho P.M., Pinho F.T. Fully-developed heat transfer in annuli with viscous dissipation // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2006. V. 49. P. 3349–3359.
4. 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. P. 113362.

Работа поддержана РФФИ (грант № 18-48-540009)

УДК 532.529.5

О РЕКОНСТРУКЦИИ ПОЛЯ СКОРОСТИ ГАЗА ПО СКОРОСТИ ЧАСТИЦ ПРИМЕСИ В ВЫСОКОГРАДИЕНТНЫХ ПОТОКАХ

Поплавский С.В.

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

e-mail: s.poplav@itam.nsc.ru

Задача восстановления скорости газа по скорости частиц дисперсной фазы возникает в газодинамических экспериментах в трех основных случаях. Во-первых, при использовании метода PIV в потоках с высокими градиентами скорости (ударные волны, сверхзвуковые струи и т.д.), где на участках релаксации фаз их скорости существенно отличаются. Во-вторых, в потоках с высокой концентрацией частиц, существенно искажающих поле скорости газа. В-третьих, при сочетании предыдущих факторов. Что касается скорости частиц, то для ее измерения существует лазерная доплеровская анемометрия (ЛДА) и упоминавшийся метод PIV, но методов измерения скорости газа в двухфазном потоке до сих пор не существует. Для традиционных инструментов (трубка Пито и термо-анемометры) измерение скорости газа остается неразрешимой задачей. Более того, даже малая примесь частиц или капель в потоке нарушает режим теплообмена вблизи термоанемометра, что ставит под сомнение результаты измерений и даже выводит его из строя. В связи с этим с 70-х годов прошлого века стали развиваться методы косвенного определения скорости газа в двухфазном потоке по скорости частиц дисперсной фазы с учетом их инерционности и аэродинамического сопротивления. В данной работе рассматриваются особенности этих методов, их ограничения и применение в различных задачах.

Впервые попытка реконструкции скорости газа по скорости частиц была выполнена с данными ЛДА [1]. Позже появились работы по коррекции скорости частиц, измеренной методом PIV [2-4]. Важно, что в этих работах использовались совершенно разные подходы к оценке скоростного запаздывания частиц и газа. В работах [1,2] задача решалась в предположении стоксового обтекания частиц (числа $Re<<1$), но этот подход годится только для мелких частиц (<10мкм) при малых относительных скоростях фаз (≤10м/с). В работах [3,4] было показано, что в потоках с высокими градиентами параметров (ударные волны, сверхзвуковые струи и т.д.) даже для мелких частиц число Рейнолдса может выходить за рамки стоксового режима ($Re\geq10$). Тогда аэродинамическое сопротивление частиц в десятки раз меньше, чем при стоксовом обтекании ($Cd =24/Re$), а скоростная релаксация затягивается во времени и в пространстве.

Таким образом, задача коррекции скорости трассеров для определения скорости газа наиболее актуальна именно для высоких чисел Рейнольдса межфазного взаимодействия – градиентные потоки, ударные волны, сверхзвуковые струи, вихревые структуры и т.д. ($Re\geq10$). Для нестоксовых режимов межфазного взаимодействия задача восстановления скорости газа по данным PIV решалась в работах [3,4]. В [3] в тестовых экспериментах методом PIV были получены профили скорости трассеров (туман глицерина) в потоке за проходящей ударной волной. Из уравнения движения частиц в Ньютоновом виде был найден аналитический вид поправки, позволяющей определять скорость газа по скорости частиц $u(x)=f[(v(x)]$. Особенность метода в том, что размер частиц и их аэродинамическое сопротивление, определяющие скоростное отставание от газа, могут оставаться неизвестными, т.к. они входят в константу процесса λ – длина скоростной релаксации частиц, а она определяется из исходных данных PIV аппроксимацией последних функцией $f[(v(x)]$.

В работе [4] этот метод был применен для вычисления профиля скорости газа в сверхзвуковой недорасширенной струе с теми же трассерами и константой λ, что и в [3]. Но в ряде задач величина λ не определяется, а в газожидкостных струях вводить в поток тестовые трассеры, как в [4], бессмысленно, т.к. скорость дисперсной фазы измеряется по круп-ным каплям. Обобщение метода для таких случаев заключается в измерении дисперсности капель и оценке аэродинамического сопротивления. В [5] этот подход был применен к профилям скорости капель, полученным методом ЛДА. Коррекция выполняется в два этапа: предварительная коррекция с оценочным значением λ дает приближенный профиль скорости газа; уточненная коррекция выполняется по λ с аэродинамическим сопротивлением для числа Re относительной скорости капель и газа. Этот подход тестировался на высокоскоростных газожидкостных струях и показал высокую эффективность.

Список литературы

1. Гродзовский Г.Л. О движении мелких частиц в потоке газа // Уч. Зап. ЦАГИ. 1974. Т. 5. № 2. С. 80–89.
2. Koike S., Takahashi H., Tanaka K., et al. Correction method for Particle Velocimetry data based on the Stokes drag law // AIAA J. 2007. V. 45. No. 11. P. 2770–2777.
3. Boiko V.M., Pivovarov A.A., Poplavski S.V. Measurement of gas velocity in a high-gradient flow, based on velocity of Tracer Particles // Combust., Expl., Shock Waves. 2013. V. 49, No. 5. P. 548–554.
4. Boiko V.M., Zapryagaev V.I., Pivovarov A.A., Poplav-ski S.V. Correction of PIV data for reconstruction of the gas velocity in a supersonic underexpanded jet // Combust., Expl., Shock Waves. 2015. V. 51, No. 5. P. 587–596.
5. Boiko V.M., Nesterov A.Yu., Poplavski S.V. Liquid atomization in a high-speed coaxial gas jet // Thermophysics and Aeromechanics. 2019. V. 26. No. 3. P. 385–398.

Исследование выполнено в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы (проект АААА-А17-117030610137-0)

УДК 53.082.53: 531.7: 681.786

ИЗМЕРЕНИЕ ДИАМЕТРА ЦИЛИНДРОВ С КОРРЕКЦИЕЙ ОШИБКИ СМЕЩЕНИЯ ДЛЯ НЕТЕЛЕЦЕНТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

Рахманов В.В., Двойнишников С.В., Семёнов Д.О., Главный В.Г.

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

e-mail: Rahmanov@inbox.ru

В настоящее время широко используются различные методики, позволяющие осуществлять бесконтактное измерение диаметра цилиндров с высокой точностью. Наилучшие значения точности измерения обеспечивают оптические теневые и дифракционные методы измерения на прямом рассеивании. Такие методы позволяет достигать погрешности измерения диаметра порядка 0,01% от диапазона [1], [2]. Однако не везде есть возможность обеспечить измерения на просвет. Для измерений геометрических размеров объектов на обратном рассеивании точность измерения составляет уже порядка 0,1% от диапазона измерений [3]. И для тех приложений, где данная погрешность считается удовлетворительной возможно использовать системы технического зрения для контроля геометрических параметров изделий.

При использовании систем технического зрения на основе цифровых видеокамер высокого разрешения возникают дополнительные требования к стабильности положения объекта измерения и условиям освещения. Применение недорогих нетелецентрических объективов с высокой пространственной аберрацией привносит дополнительную погрешность в измерения размеров, так как не позволяют получить истинное изображение контролируемого изделия [4] при его смещении вдоль оптической оси приемного объектива.

Цель данной работы заключается в разработке метода измерения диаметра цилиндрического объекта, на основе триангуляционного метода светового сечения, адаптированного для измерения цилиндрической поверхности.

Для коррекции ошибки измерения диаметра цилиндра, возникающей из-за смещения объекта вдоль оптической оси без использования телецентрической оптики применяется адаптированный триангуляционный метод. Триангуляционный метод позволяет найти расстояние до объекта L и ввести поправочный коэффициент M(L) для видимого на оптической приёмке размера Y.

Метод триангуляции реализован при помощи формирования дополнительного светового сечения ось плоскости которого расположена под углом к оптической оси камеры. За счет этого угла при перемещении изделия вдоль оптической оси происходит перемещение изображения сечения на полученном изображении.

Пусть на принимаемом изображении (см. рис. 1). точки A и B имеют координаты (X_A, Y_A) и (X_B, Y_B) соответственно. Тогда диаметр цилиндра D будет линейно зависеть от вертикального размера линии:

$$D = M * Y = M * (Y_B - Y_A), \qquad (1)$$

где M –коэффициент пересчета диаметра объекта.

Параметр M линейно зависит от расстояния до измеряемого объекта L:

$$M(L) = k * L + m, \qquad (2)$$

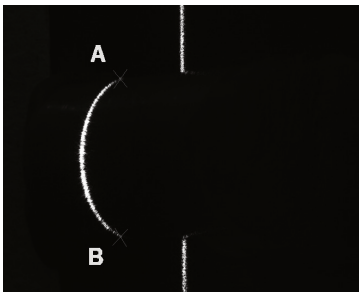


Рис. 1 Изображение цилиндра в свете лазерного сечения.

где k, m – коэффициенты, вычисляемые в результате калибровки. Расстояние L вычисляют с помощью калибровочной функции F, которая может быть аппроксимирована полиномом третьей степени:

$$L(X) = L\left(\frac{X_A + X_B}{2}\right) = aX^3 + bX^2 + cX + d. \qquad (3)$$

Для проверки работоспособности данного способа изменения диаметра был собран макет лабораторной установки и проведены измерения диаметра металлического цилиндра диаметром 8,196 мм. Цилиндр случайным образом перемещался вдоль оптической оси на ± 1 мм. По результатам изменений максимальная ошибка измерения диаметра составила 11 мкм.

Предложен метод измерения диаметра цилиндрического объекта с коррекцией ошибки смещения. Метод обеспечивает высокоточные измерения геометрических параметров цилиндрических объектов при использовании классической нетелецентрической оптики фотоприемника.

Список литературы

1. Шкретов А.М. Техническая реализация измерителей диаметра на основе теневого метода измерения в расходящемся световом пучке / Шкретов А.М., Фёдоров Е.М. // Информационно-измерительная техника и технологии. Vатериалы V научно-практической конференции. Томск. 19–23 мая 2014. Томск: Изд-во ТПУ. 2014. С. 147–151.
2. Завьялов П.С. Оптико-электронная система бесконтактного контроля геометрических параметров бронебойных сердечников и пуль / Завьялов П.С., Власов Е.В., Гущина А.А., Соколов Е.В., Сартаков В.Ю. // Датчики и Системы. 2018. № 10. С. 34–39.
3. Тарасов В.В. Лазерные сканирующие системы контроля геометрических параметров изделий массового производства: диссертация ... доктора технических наук. 05.11.07. СПб. 1998. 211 с. Ил. РГБ ОД. 71:00-5/37-7.
4. Новиков Д.Н., Суранов А.Я. Способ компенсации продольного движения объекта при измерении диаметра // Известия АлтГУ. 2014. №1–2. С. 204–206.

Экспериментальная работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН, исследование функций измерительного комплекса выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 18-31-20036).

УДК 004.67

ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ СИСТЕМА ВИЗУАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ ВНУТРЕННЕЙ ПОЛОСТИ ВИХРЕВОЙ КАМЕРЫ

Семенов Д.О.[1], Двойнишников С.В.[2], Куликов Д.В.[2], Меледин В.Г.[2]

[1] Новосибирский государственный университет
[2] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

e-mail: SeemDima@gmail.com

Вихревые камеры используются во многих энергетических системах, углеводородных топках и технологических печах. Исследование аэродинамических процессов внутри вихревых камер является актуальной задачей [1]. Эксперименты на таких установках обычно сопровождаются сложными условиями работы внутри самой камеры. Высокая температура внутри камеры помимо перегрева оптических и электронных компонентов систем диагностики, приводит к интенсивному тепловому излучению от поверхности вихревой камеры в видимом спектре, что затрудняет использование систем видеонаблюдения. Наличие сильно загрязняющих оптические поверхности отложений в исследуемом объеме также накладывает повышенные требования к системам диагностики отложений внутри вихревых камер.

В ИТ СО РАН разрабатывается система визуализации отложений внутри вихревой камеры, предназначенная для работы в условиях сильного загрязнения поверхностей и температуры достигающей более 1200 градусов по цельсию. Конструкция данной системы должна обеспечивать охлаждение корпуса, наблюдение через отверстие малого диаметра и освещение внутренней полости вихревой камеры, также должен осуществляться контроль перегрева системы.

Целью данной работы является разработка программного обеспечения для управления аппаратной частью системы визуальной диагностики внутренней полости вихревой камеры.

Разработанная система визуализации состоит из охлаждаемого проточной водой корпуса цилиндрической формы. Корпус на дне имеет отверстие диаметром 1мм, через которое ведется наблюдение с помощью видеокамеры DMM 25GP031-ML с управляемым затвором. Также на дне установлено охлаждаемый водой иллюминатор, за которым установлен осветитель для подсветки полости камеры. Для контроля температуры на камере и на осветителе установлены датчики температуры ds18b20. Изображение с камеры наблюдается на персональном компьютере, куда видеопоток передается по сети Ethernet. Управление аппаратной частью системы визуализации осуществляется с помощью программируемого микроконтроллера Iskra JS на базе 32-битного микроконтроллера ARM Cortex-M4.

Для управления аппаратной частью применен микроконтроллер Iskra JS. Микроконтроллер должен передавать данные по сети Ethernet, управлять затвором камеры и осуществлять включение осветителей по алгоритмам, зависящим от команд, поступающих с компьютера. Необходимо учесть задержки на включение блоков питания осветителей, чтобы отснятый кадр всегда был полностью освещён. Также необходимо реализовать опрос датчиков температуры и, в случае превышения критических значений, сигнализировать об этом.

Разработано программное обеспечение микроконтроллера, позволяющее передавать сообщения по сети Ethernet. Связь с компьютером осуществляется с помощью платы расширения Ethernet Shield по написанному поверх TCP-IP протоколу связи. На базе микроконтроллера организован сервер, осуществляющий ответы на запросы, пришедшие от управляющего компьютер. С помощью микроконтроллера осуществляется управление затвором камеры, включением и выключением осветителей и опрос датчиков температуры по протоколу MODBUS. Учтены все необходимые задержки драйверов питания осветителей на создание синхроимпульса перед началом кадра видеокамеры (рис. 1).

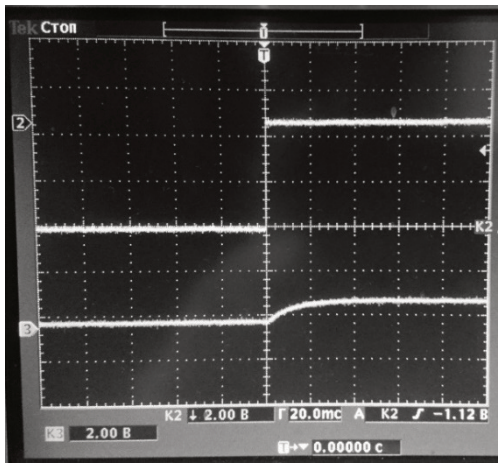


Рис. 1. Осциллограмма задержки блока питания осветителя после подачи синхросигнала от микроконтроллера.

Разработан программно-аппаратный модуль системы визуальной диагностики внутренней полости вихревой камеры. Создано программное обеспечение для управляющего микроконтроллера, позволяющего удаленно работать со всей системой.

Список литературы

1. Dvoynishnikov S.V., Kabardin I.K., Meledin V.G. Advanced Phase Triangulation Methods for 3D Shape Measurements in Scientific and Industrial Applications. In: Sergiyenko O., Flores-Fuentes W., Mercorelli P. (eds) Machine Vision and Navigation. Springer, Cham. 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-22587-2_21

Экспериментальная работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН, исследование функций измерительного комплекса выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 18-31-20036).

УДК 543.42

ТЕРМОМЕТРИЯ В ЗАКРУЧЕННЫХ ПЛАМЕНАХ МЕТОДОМ ПЛОСКОСТНОЙ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ

Толстогузов Р.В.[1,2,*], Шараборин Д.К.[1,2], Лобасов А.С.[1,2], Чикишев Л.М.[1,2], Дулин В.М.[1,2]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
[2] Новосибирский государственный университет, Новосибирск

[*]e-mail: enot.roman@gmail.com

Подробные экспериментальные исследования особенностей горения в сложных трехмерных турбулентных потоках, которые часто являются нестационарными, подразумевают анализ локального тепломассопереноса и условий химического реагирования. Для такого анализа требуется одновременные измерения пространственных распределений скорости, концентрации веществ и температуры. В настоящее время плоская лазерно-индуцированная флуоресценция (Planar Laser-Induced Fluorescence, PLIF) стала стандартным и хорошо зарекомендовавшим себя оптическим методом измерения концентрации компонент в нереагирующих и реагирующих газообразных потоках [1]. Выход флуоресценции для разных спектральных областей у различных типов молекул (например, для толуола) может иметь достаточно различную чувствительность к температуре. Стратегия регистрации отношения сигнала в двух участках спектра флуоресценции для таких видов молекул способна обеспечить достаточно точные измерения температуры при однократном освещении лазерным излучением. Данный метод обладает высокой точностью калибровки, поскольку соотношение между интегральными интенсивностями двух полос слабо зависит от локальной плотности лазерного излучения или концентрации молекулы-индикатора.

Одной из возможных стратегий измерения 2D-распределений температуры ПЛИФ гидроксильного радикала (OH) изображениям является измерение отношения интенсивности для различных участков спектра в зависимости от температуры [2]. В данном подходе используется однократное освещение потока и регистрируется локальное соотношение интенсивности двух различных участков спектра флуоресценции с использованием двух камер. В основе метода лежит вклад столкновений и теплового движения молекул в интенсивность флуоресценции для линии с энергией больше энергии фотонов возбуждающего излучения.

В настоящей работе представлена отработка методов измерения полей температуры на основе ПЛИФ OH при возбуждении полосы (1–0) перехода $A^2\Sigma^+$–$X^2\Pi$ в турбулентном закрученном пламени метана предварительно-перемешанной смеси. Эффективность ПЛИФ термометрии на основании регистрации полос (2–0) и (0–0), (1–1) проверена численно с использованием пакета программ LASKIN для переходов $Q_2(7)$, $Q_1(8)$, $R_1(14)$, $P_1(2)$. Показано, что наиболее эффективной является линия $Q_1(8)$. Установлено, что тушение флуоресценции оказывает незначительный эффект на измерения температуры.

Экспериментальный стенд представляет собой горелочное устройство с профилированным соплом Витошинского, имеющим внутренний диаметр $d = 15$ мм с возможностью подачи предварительно перемешанной смеси топлива и воздуха. Внутри сопла был установлен лопастный завихритель с параметром крутки S = 1, что соответствует сильной закрутке. Коэффициент избытка топлива для метано-воздушной смеси Ф был равен 0.7, число Рейнольдса составляло Re = 5 000. Измерительная система состояла из перестраиваемого импульсного лазера на красителе, импульсного Nd:YAG лазера накачки и двух интенсифицированных ПЗС камер на основе электронно-оптических преобразователей. Перестраиваемый лазер возбуждал флуоресценцию OH на длине волны перехода $Q_1(8)$ полосы $A^2\Sigma^+$–$X^2\Pi$ (1–0). Интенсивность сигнала флуоресценции OH для полосы (2–0) и для полос (0–0), (1–1) регистрировалась двумя интенсифицированными камерами. Во втором случае была использована камера Princeton instruments PI-MAX-4, оснащенная УФ-объективом и полосовым оптическим фильтром (310 ± 10 нм). Изображение для перехода (2–0) было получено с использованием ПЗС-КМОП камеры LaVision, оснащенной усилителем на основе УФ ЭОП (LaVision IRO). ЭОП был также оснащен УФ-объективом и полосовым фильтром (265 ± 5 нм). Время экспозиции кадра каждого изображения составляло 200 нс.

В работе сделан вывод о том, что при возбуждении перехода $Q_1(8)$ соотношение интенсивности сигналов флуоресценции для полосы (2–0) и полос (0–0), (1–1) обеспечивает высокую чувствительность к температуре (а именно, выше 1:5 для диапазона 1200–2200 K) и не подвержено значительному влиянию тушения флуоресценции. В работе сделан вывод, что данный метод может быть реализован при однократном импульсном освещении лазером и является эффективным для обнаружения и регистрации горячих зон в продуктах сгорания.

Список литературы

1. Thurber M.C., Grisch F., Kirby B.J., Votsmeier M. and Hanson R.K., 1998, Measurements and modeling of acetone laser-induced fluorescence with implications for temperature-imaging diagnostics. Appl. Opt. 37(21):4963–4978.
2. Copeland C., Friedman J. and Renksizbulut M., 2007, Planar temperature imaging using thermally assisted laser induced fluorescence of OH in a methane–air flame. Exp. Thermal Fluid Sci. 31(3):221–236.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Уникальный идентификатор проекта RFMEFI58318X0035



СЕКЦИЯ 7
Теплофизические свойства веществ, тепломассообмен на микро- и наномасштабах



УДК 536.41:669.12

ТЕРМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖЕЛЕЗА В ТВЕРДОМ И ЖИДКОМ СОСТОЯНИЯХ

Абдуллаев Р.Н., Хайрулин Р.А., Станкус С.В.

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

e-mail: abdullaev.rasul88@gmail.com

Железо – один из самых распространенных на Земле и наиболее используемых в промышленности металлов. В твердом состоянии железо – ферромагнетик, существующий в трех кристаллических модификациях (α, γ и δ-фаза) [1]. Для оптимизации технологий производства и применения сплавов и другой продукции на его основе необходимы надежные данные по термическим свойствам железа в твердом и жидком состояниях и их изменениям при кристаллизации – плавлении и в ходе структурных превращений. Исследование термических свойств железа также имеет большое фундаментальное значение. Плотность является одной из важнейших характеристик вещества. Она определяется структурой ближнего порядка и характером межатомного взаимодействия, непосредственно связана с одним из главных термодинамических параметров состояния – объемом. По изменению плотности при плавлении можно судить об особенностях электронного строения вещества, изменении характера химической связи и структуре расплава, что особенно ценно для сложных многокомпонентных систем [2]. Кроме того точные данные по плотности в широких интервалах параметров состояния, включая области фазовых превращений необходимы для определения других теплофизических характеристик веществ и материалов и построения широкодиапазонных уравнений состояний.

Термические свойства железа исследовались в течение длительного времени и в большом количестве работ [3–10], однако результаты измерений плохо согласуются между собой. Особенно это относится к высокотемпературной твердой δ-фазе и к жидкому состоянию, для которого измерения проводились в основном методами Архимеда, максимального давления в газовом пузырьке или различными вариантами метода капли. Так разброс литературных данных по плотности расплава при температуре плавления достигает около 2% [3, 4], а результаты экспериментальных исследований объемного коэффициента теплового расширения (ОКТР) жидкого железа отличаются более чем в два раза [4, 5].

Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование плотности и теплового расширения чистого железа в широком интервале температур твердого и жидкого состояний (от комнатной температуры до ≈ 2070 К), включая области плавления – кристаллизации и структурных превращений. Измерения были проведены методом просвечивания образцов узким пучком гамма-излучения [11]. В качестве исследуемого образца использовалось железо чистотой 99,98 масс. % в тигле из оксида бериллия. Измерения проводились в атмосфере чистого аргона.

На основании полученных результатов построена температурная зависимость плотности твердого и жидкого железа и рассчитаны средневзвешенные значения его объемного коэффициента теплового расширения и скачков плотности при фазовом переходе твердое тело – жидкость и при структурных фазовых переходах. Проведено сравнение данных настоящей работы с результатами других авторов. Показано, что полученные в настоящей работе значения относительного скачка плотности при плавлении и объемного коэффициента теплового расширения жидкого железа являются наиболее надежными.

Список литературы

1. Swartzendruber L.J. The Fe (iron) system // Bull. Alloy Phase Diagr. 1982. V. 3. No. 2. P. 161–165.
2. Регель А.Р., Глазов В.М. Периодический закон и физические свойства электронных расплавов // М.: Наука, 1979. 309 с.
3. Frohberg M.G., Weber R. Dichtemessungen an Eisen-Kobalt-und Eisen-Kupfer-Legierungen // Arch. Eisenhuttenw. 1964. V. 35. No. 9. P. 877–883.
4. Lucas L.D. Density of Metals at High Temperatures in the Solid and Molten States, Part 2 // Mem. Sci. Rev. Met. 1972. V. 69. No. 6. P. 479–492.
5. Kirshenbaum A.D., Cahill J.A. The density of liquid iron from the melting point to 2500 K // Trans. Met. Soc. AIME. 1962. V. 224. P. 816–819.
6. Assael M.J. et al. Reference data for the density and viscosity of liquid aluminum and liquid iron // J. Phys. Chem. Ref. Data. 2006. V. 35. No. 1. P. 285–300.
7. Watanabe M., Adachi M., Fukuyama H. Densities of Fe–Ni melts and thermodynamic correlations // J. Mater. Sci. 2016. V. 51. No. 7. P. 3303–3310.
8. Brillo J., Egry I., Matsushita T. Density and excess volumes of liquid copper, cobalt, iron and their binary and ternary alloys // Z. Metallkd. 2006. V. 97. No. 11. P. 1526–1532.
9. Kobatake H., Brillo J. Density and viscosity of ternary Cr–Fe–Ni liquid alloys Densities of Fe–Ni melts and thermodynamic correlations // J. Mater. Sci. 2013. V. 48, No. 19. P. 6818–6824.
10. Drotning W.D. Thermal expansion of iron, cobalt, nickel, and copper at temperatures up to 600 K above melting // HTHP. 1981. V. 13. No. 4. P. 441–458.
11. Станкус С.В., Хайрулин Р.А. Измерение термических свойств платины в интервале температур 293–2300 К методом проникающего излучения // ТВТ. 1992. Т. 30. № 3. С. 487–494.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН (АААА-А17-117022850029-9)

УДК 536.223:669.765'885

ПЕРЕНОСНЫЕ СВОЙСТВА ЖИДКИХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ RB–BI

Агажанов А.Ш., Абдуллаев Р.Н., Самошкин Д.А., Станкус С.В.

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

e-mail: scousekz@gmail.com

Висмутиды щелочных металлов обладают рядом интересных физико-химических свойств. Так, сплавы KBi_2, $RbBi_2$ и $CsBi_2$ являются сверхпроводниками, а соединения K_3Bi, Rb_3Bi и Cs_3Bi проявляют свойства полупроводников [1]. На концентрационных зависимостях удельного электросопротивления жидких систем «щелочной металл – висмут» экспериментально обнаружены острые пики при 25 ат. % Bi (системы Li–Bi, Na–Bi), либо широкие максимумы, лежащие в интервале 25–40 ат. % Bi (K–Bi, Rb–Bi, Cs–Bi) [2–3]. При этих концентрациях электросопротивление расплавов в 15–40 раз превышает электросопротивление жидкого висмута. Согласно современным представлениям эти эффекты обусловлены тенденцией к образованию в этих сплавах ассоциатов с частично ионным характером межатомного взаимодействия [4]. Концентрация таких комплексов достигает максимума при определенных стехиометрических составах. Для материаловедения и развития теоретических представлений о ионных структурах в подобных системах требуется высоконадежная экспериментальная информация об их теплофизических и, в том числе, переносных свойствах.

В настоящей работе методом лазерной вспышки измерены теплопроводность (λ) и температуропроводность (a) жидких сплавов системы Rb-Bi с содержанием висмута X_{Bi} =27; 50 и 66,7 ат. % в интервале температур от линии ликвидуса до T_{max} = 1173 К. Для экспериментов использовались герметичные измерительные ячейки из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, в которых толщина зондируемого слоя сплава составляла 2,4–2,6 мм. Процедуры по приготовлению образцов, включая взвешивание компонентов Rb и Bi на электронных весах, заполнение и герметизация ячеек путем электродуговой сваркой, проводились в атмосфере высокочистого аргона (99,992 об. %) внутри перчаточного бокса. Погрешность измерений λ и a расплавов составила 4–6% в зависимости от температуры.

Эксперименты выполнены на автоматизированной установке LFA 427 фирмы NETZSCH. Перед началом измерений ячейку с образцом выдерживали в течение часа при T_{max}. Проведенные оценки с использованием данных о коэффициентах взаимной диффузии в расплавах рубидий–висмут [5] показали, что этого времени достаточно для получения однородного по составу сплава. Быстрой гомогенизации расплава также способствует интенсивное химическое взаимодействие между жидким висмутом и рубидием [6]. Измерения проводились в режиме охлаждения от T_{max} до твердого состояния. Воспроизводимость результатов в различных термических циклах подтвердила химическую инертность материала ячейки к жидким сплавам Rb-Bi.

На рис. 1 представлена концентрационная зависимость теплопроводности для изученных расплавов системы Rb-Bi при 1000 К. Как видно из графика, в интервале концентраций X_{Bi} = 27…67 ат. % теплопроводность сплавов остается намного ниже аддитивных значений и имеет крайне низкие значения, характерные для жидких солей [7]. Наблюдается размытый (вблизи 30–50 ат. % Bi) минимум теплопроводности, где значение λ в 10–11 раз меньше теплопроводности, рассчитанной по правилу аддитивности, что косвенно указывает на наличие ионных комплексов в этой системе.

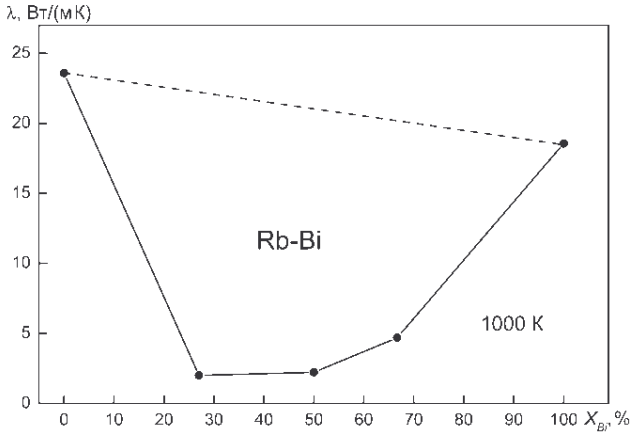


Рис. 1. Концентрационная зависимость теплопроводности жидких сплавов системы Rb-Bi при 1000 К.

Концентрационная зависимость температуропроводности имеет аналогичный вид, при этом в области минимума значение a в 30 раз меньше, чем у жидкого рубидия.

Список литературы

1. Самсонов Г.В., Абдусалямова М.Н., Черногоренко В.Б. Висмутиды. Киев: Наукова думка. 1977. 184 с.
2. Meijer J.A., van der Lugt W. Resistivity of Liquid K–Bi and Cs–Bi Alloys // J. Phys.: Condens. Matter. 1989. V. 1. No. 48. P. 9779–9784.
3. Xu R., Kinderman R., van der Lugt W. Electrical Resistivities of Liquid Na–Bi and Rb–Bi Alloys // J. Phys.: Condens. Matter. 1991. V. 3. No. 1. P. 127–133.
4. 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.
5. Khairulin R.A., Stankus S.V., Abdullaev R.N. Mutual Diffusion in Liquid Rubidium–Bismuth Alloys // J. Eng. Phys. Thermophys. 2018. V. 27. No. 3. P. 303–306.
6. Stankus S.V., Abdullaev R.N., Khairulin R.A. Density of rubidium–bismuth melts // High Temp-High Press. 2018. V. 47, No. 5. P. 403–415.
7. An X., Cheng J., Yin H. et al. Thermal conductivity of high temperature fluoride molten salt determined by laser flash technique // Int. J. Heat Mass Tran. 2015. V. 90. P. 872–877.

Работа поддержана совместно РФФИ (грант № 18-08-00389) и РНФ (грант № 16-19-10023-П)

УДК 536.223:536.632:669.45′882

ТРАНСПОРТНЫЕ И КАЛОРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭВТЕКТИЧЕСКОГО СПЛАВА K-Pb В ЖИДКОМ СОСТОЯНИИ

Агажанов А.Ш., Хайрулин А.Р., Абдуллаев Р.Н., Станкус С.В.

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

e-mail: scousekz@gmail.com

Жидкие сплавы системы K-Pb относятся к уникальному классу расплавов [1], в которых, помимо металлического типа связи, в той или иной степени проявляется тенденция к образованию ионной связи. Это приводит к необычному поведению температурных и концентрационных зависимостей многих физических свойств такой системы [2]. Практическая значимость исследования данной системы связана с тем, что сплав K-Pb эвтектического состава (90,7 ат. % Pb) в более далекой перспективе предлагается использовать в качестве жидкометаллического теплоносителя в ядерных реакторах на быстрых нейтронах. В [3] было установлено, что жидкая эвтектика K-Pb обладает гораздо меньшей коррозионной и эрозийной активностью по отношению к конструкционным материалам реактора по сравнению с чистым свинцом, используемым в настоящее время в охлаждающих контурах реакторов. Однако, за исключением термических свойств [4], в литературе отсутствуют подробные и надежные экспериментальные данные по ряду теплофизических свойств жидкой эвтектики и, в частности, теплопроводности и теплоемкости. Целью настоящей работы являлось комплексное экспериментальное исследование транспортных и калорических свойств эвтектического сплава K-Pb в широком интервале температур жидкого состояния.

Теплопроводность (λ) эвтектики определялась методом лазерной вспышки [5] на автоматизированной установке LFA-427 в интервале температур 543–1175 K. Измерения приращения энтальпии (h_{298}) относительно комнатной температуры ($h_{298} = 0$ при 298,15 K) сплава $K_{9,3}Pb_{90,7}$ были выполнены методом смешения на массивном калориметре с изотермической оболочкой в интервале температур 579–1076 K. Удельная теплоемкость (c_p) была получена дифференцированием сглаженных значений h_{298}. Температуропроводность эвтектики рассчитывалась по результатам измерения λ, полученным значениям c_p и литературным данным по плотности из [4]. Оцениваемые погрешности полученных данных, подтвержденные опытами на эталонных образцах, составили 4–6%, 0,2–0,3% и 1,5% для λ (a), c_p и h_{298}, соответственно.

Для экспериментов на LFA-427 и калориметре использовались герметичные ампулы из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Процедуры приготовления гомогенных сплавов, заполнения и герметизации ампул электродуговой сваркой проводились исключительно внутри перчаточного бокса с высокочистым аргоном (99,992 об. %). Герметизированные ампулы с навесками K и Pb прогревали до температур 800…900 K, при которых их многократно переворачивали для хорошего перемешивания компонентов эвтектики.

Результаты измерений теплопроводности λ эвтектического сплава $K_{9,3}Pb_{90,7}$ в жидком состоянии представлены на рис. 1. Для сравнения на график также нанесены наши данные по теплопроводности жидких калия и свинца. Как видно из графика, теплопроводность расплава $K_{9,3}Pb_{90,7}$ растет с увеличением температуры и лежит ниже данных для чистого свинца, примерно, на 33%. Таким образом, добавка 9 ат. % высокотеплопроводного калия к свинцу не приводит к увеличению теплопроводности сплава, а наоборот, довольно существенно ее уменьшает. Такое поведение кривой λ(T) косвенно указывает на существование в жидких сплавах системы K–Pb интерметаллических комплексов с частично ионным характером связи [1], которые оказывают сильное влияния на транспортные свойства расплавов этой системы.

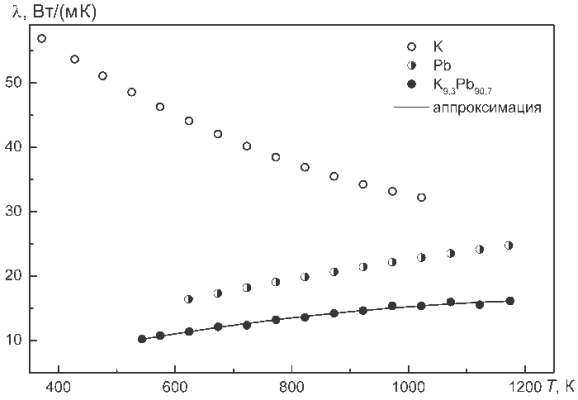


Рис. 1. Теплопроводность сплава $K_{9,3}Pb_{90,7}$ и чистых компонент.

Для всех исследованных свойств получены аппроксимационные уравнения и разработаны таблицы рекомендуемых значений вместе с оценками их погрешностей.

Список литературы

1. Van der Lugt W. Polyanions in liquid ionic alloys: a decade of research // J. Phys-Condens. Mat. 1996. V. 8, No. 34. P. 6115–6138.
2. Saboungi M.-L., Leonard S.R., Ellefson J. Anomalous behavior of liquid K–Pb alloys: excess stability, entropy, and heat capacity // J. Chem. Phys. 1986. V. 85, No. 10. P. 6072–6081.
3. Субботин В.И., Арнольдов М.Н., Козлов Ф.А., Шимкевич А.Л. Жидкометаллические теплоносители для ядерной энергетики //Атомная энергия. 2002. Т. 92. № 1. С. 31–42.
4. Абдуллаев Р.Н., Хайрулин Р.А., Станкус С.В. Плотность сплава калий-свинец эвтектического состава // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20. № 1. С. 89–94.
5. Agzahanov A.Sh., Abdullaev R.N., Samoshkin D.A., Stankus S.V. Thermal conductivity and thermal diffusivity of Li-Pb eutectic in the temperature range of 293–1273 K // Fusion Eng. Des. 2020. V. 152. No. 111456. P. 1–5.

Работа поддержана совместно РФФИ (грант № 18-38-00070) и РНФ (грант № 19-79-00024)

УДК 541.11.54

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВАНИЯ УГЛЕРОДНЫХ НАНОЧАСТИЦ C_{32} В СРЕДЕ АЗОТА

Барбин Н.М.[1], Якупова Л.В.[1], Терентьев Д.И.[1], Алексеев С.Г.[2]

[1]Уральский институт ГПС МЧС России, Екатеринбург
[2]Уральский НИИ ВДПО, Екатеринбург

E-mail:NMBarbin@mail.ru

Знание температуры устойчивости углеродных наночастиц необходимо как для разработки технологий производства и очистки углеродных наночастиц, так и для их применения [1].

В работе методом термодинамического моделирования изучено нагревание углеродных наночастиц C_{32} в атмосфере азота при давлении 10^5 Па.

Термодинамическое моделирование заключается в термодинамическом анализе равновесного состояния системы в целом [2]. В расчетах использован программный комплекс TERRA, представляющий собой этап дальнейшего развития пакета программ ASTRA. Расчеты состава фаз и характеристик проводятся с использованием справочной базы данных [3–6].

При расчете использованы термодинамические параметры конденсированных углеродных наночастиц $C_{32(к)}$, паров C, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, газообразных CN, CN_2, N_2C, NCN, C_2N, CNC, CCN, C_2N_2, C_4N, C_5N и растворы углеродных наночастиц $C_{1(р)}$, $C_{2(р)}$, $C_{3(р)}$, $C_{4(р)}$, $C_{5(р)}$, $C_{6(р)}$, $C_{7(р)}$, $C_{28(р)}$, $C_{32(р)}$. Температурный интервал от 273 до 3373 К, давление 0,1 МПа. Соотношение углерода к азоту – 1:2.

На Рис.1 представлено распределение наноуглерода в системе C_{32}-N_2.

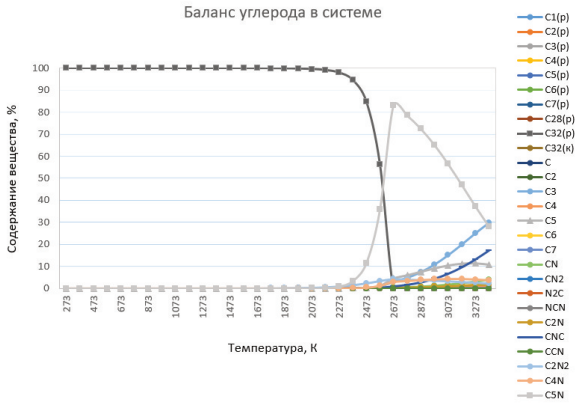


Рис.1 Распределение углерода в системе C_{32}-N_2.

В температурном интервале от 273 до 973 К содержание раствора углерода $C_{32(р)}$ в системе C_{32}-N_2 составляет 100%. В интервале температур от 973 до 1773 К процентное содержание $C_{32(р)}$ снизилось до 99,94% в связи с незначительным образованием газообразного C_2N_2. Начиная с 2073 К и выше наблюдается рост следующих газообразных C_5N, C_4N, CNC и паров C_3, C_5. Дальнейшее повышение температуры в системе до 2673 К приводит к линейному уменьшению содержания раствора углерода $C_{32(р)}$ практически до 0. При температуре 2673 К $C_{32(р)}$ обнулены, а процентное содержание имеющихся компонентов в газообразном и парообразном состоянии следующее: 82% – C_5N, 5% – C_5, 5% – C_2N_2, 3% – C_3, 3% – C_4N, 2% – CNC.

В интервале 2373-2673 К происходит рост количества газообразного C_5N от 4% до 84%. При температуре от 2673 К наблюдается точка перегиба. В температурном интервале от 2673 до 3373 К содержание C_5N уменьшается и составляет 28%. Это вызвано резким ростом газообразного CNC и паров C_3, C_5.

При высоких температурах в системе замечен рост других газообразных и раствора C_{28}, но их содержание, по сравнению с другими мало и не превышает 4%.

Список литературы

1. Бородин В.И., Трухачева В.А. Термическая устойчивость фуллеренов // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. №14. С. 53–55.
2. Ватолин Н.А., Моисеев Г.К., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных системах. М.: Металлургия. 1994. 352 с.
3. Моисеев Г.К., Ватолин Н.А. Термодинамические свойства некоторых газообразных фуллеренов // Журнал физической химии. 2002. Т. 76. №2. С. 217–220.
4. Моисеев Г.К., Ватолин Н.А. Оценка стандартной энтальпии образования (СЭО) метастабильных конденсированных «малых» самоассоциатов углерода и некоторых металлов // Доклады академии наук. 2003. Т. 392. № 5. С. 653–656.
5. Barbin N.M., Dan V.P., Terentiev D.I., Alekseev S.G. Thermodinamic modeling of the Behavior of Higher Fullerenes C_{84} when Heated in an inert Atmosphere. – Smart Nanocomposites. 2016. V. 7. No. 2. P. 251–253.
6. Барбин Н.М., Дан В.П., Терентьев Д.И., Алексеев С.Г. Моделирование поведения малого углеродного кластера С3 в процессе нагревания в среде аргона// Наноматериалы и наноструктуры – XXI век. 2016.Т. 7. № 4. С. 8–13.

УДК 539.232

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕР-ГРАФЕНОВЫХ КОМПОЗИТОВ С НАНЕСЕННЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ СПЛАВА ЗОЛОТА И СЕРЕБРА

Бойко Е.В.[1,2], Костогруд И.А.[1,] Смовж Д.В.[1,2]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
[2] Новосибирский государственный университет

e-mail: renboyko@gmail.com

С каждым годом растёт число работ, посвященных исследованию композитов на основе углеродных материалов и наночастиц благородных металлов. Подобные структуры демонстрируют новые оптические свойства, начиная с усиления локального электромагнитного поля и заканчивая модуляцией оптического отклика [1]. В частности, свойства гибридных систем графен/наночастицы благородных металлов привлекли внимания исследователей в связи с возможностью создания фотодетекторов с управляемым откликом в видимом и инфракрасном диапазонах электромагнитного изучения, что в перспективе, позволит создавать более эффективные фотоэлементы [2]. Помимо этого, такие композиты могут использоваться в процессах фотокатализа, а также в биомедицине, для плазмонной фототермической терапии.

Явление поверхностного плазмонного резонанса, в основе которого лежат коллективные колебания электронного газа, как результат его взаимодействия с электромагнитным излучением, является очень чувствительным к структуре, размеру и форме металлических наночастиц; к структуре подложки, а также к параметрам диэлектрической среды, в которой находится сам композит графен/наночастицы благородных металлов. Изменение вышеописанных параметров может приводить как к усилению, так и ослаблению эффекта плазмонного резонанса, что напрямую влияет на эффективность устройств, работа которых основана на данном явлении: например, устройства для детектирования и зондирования молекулярных соединений, или же био- и химические, газовые сенсоров, устройства для определения показателей преломления различных сред, поверхностно-усиленная рамановская спектроскопия (SERS) [3–6].

Данная работа посвящена изучению эффекта плазмонного резонанса в системе наночастицы сплава золота и серебра/графен.

Металлические наночастицы сплава золота и серебра были нанесены на поверхность графена с помощью метода импульсной лазерной абляции. Графен был синтезирован на подложке из меди Alfa Aesar (Cu 99,8%, толщина 25 мкм) методом химического осаждения из газовой фазы при температуре 1070^{o}C при атмосферном давлении в смеси газов $Ar/H_2/CH_4$. После синтеза, графеновый слой был перенесен на полимерную поверхность (ПЭТ/ЭВА) при помощи механического метода переноса, в основе которого лежит термическое прессование. В полученных композитах были исследованы оптические свойства: при помощи спектрофотометра СФ-2000 были получены спектры поглощения излучения в диапазоне от 200 нм до 1100 нм

Исследовано явление плазмонного резонанса, возникающего в системе графен-полимер-наночастицы сплава золота и серебра. Показана возможность управления ослабления интенсивности проходящего сквозь образец электромагнитного излучения путем изменения состава и толщины напыляемого покрытия. Для исследованных наночастиц сплава золота и серебра наивысшая степень ослабления излучения приходится на диапазон волн от 400 до 600 нм. Показано, что при изменяя состав наночастиц (меняя соотношения золота и серебра в сплаве) можно достичь максимального селективного ослабления света более чем в 2,5 раза в области 500 нм, в то время как для 700 нм достигается ослабление не более чем в 2 раза. Выявлено, что использование пленок с различным соотношением металлов позволяет смещать положение плазмонного поглощения во всем оптическом диапазоне длин волн. Используя комбинацию осаждения пленок различного состава и толщины, могут быть получены оптические фильтры для управления светопропусканием/поглощением на различных участках в видимом диапазоне.

Список литературы

1. Zhu M., Chen P. and Liu M. ACS Nano. 2011. V. 5. P. 4529–4536.
2. Echtermeyer T.J., Nene P., Trushin M., Gorbachev R.V., Eiden A.L., Milana S., Sun Z., Schliemann J., Lidorikis E. and Novoselov K.S. Nano Lett. 2014. V. 14. P. 3733–3742.
3. Amendola V., Bakr O.M. and Stellacci F. Plasmonics. 2010. V. 5. P. 85–97.
4. Mayer K.M. and Hafner J.H. Chem. Rev. 2011. V. 111. P. 3828–3857.
5. Kneipp J., Kneipp H., Mclaughlin M., Brown D. and Kneipp K. Nano Lett. 2006. V. 6. P. 2225–2231.
6. Han D., F. Fang Y., Du D.Y., Huang G.S., Qiu T. and Mei Y.F. Nanoscale. 2016. V. 8. P. 9141–9145.

Работа поддержана РФФИ (грант № 18-29-19099\18).
Эксперименты по созданию композитов полимер-графен-металлические наночастицы были выполнены при финансовой поддержке ИТ СО РАН (АААА-А19-119061490008-3).
Экспериментальные исследования оптических свойств полученных композитов выполнены при финансовой поддержке РФФИ / Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 18-29-19099/18).

УДК 532.64

ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ МЕЖДУ ИЗМЕНЕНИЕМ ТЕКСТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ (ОЦЕНИВАЕМОЙ ТРЕХМЕРНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ШЕРОХОВАТОСТИ) И СМАЧИВАНИЕМ

Исламова А.Г.

Томский политехнический унивеситет

e-mail: anastasya.isl@gmail.com

Развитие высокотехнологичных отраслей промышленности, например, микроэлектроники, космической техники и авиации возможно при разработке энергоэффективной ресурсосберегающей технике и технологий, работающей на базе фазовых превращений малых объемов жидкостей. Характерные габаритные размеры таких устройств не превышают нескольких десятков миллиметров. При этом значительно повышается уровень требований к технологическим поверхностям из области диапазона отклонений формы и волнистости в область микро- и наношероховатости. Шероховатость один из значимых факторов, влияющих на смачивание поверхностей металлов. Современные представления о смачивании и растекании малых объемов жидкостей не способны объяснить эффект инверсии смачивания после абразивной обработки поверхностей металлов.

Целью работы является установление закономерностей между изменением текстуры поверхности стали (оцениваемой трехмерными параметрами шероховатости) и смачиванием (оцениваемом по статическому и динамическим контактным углам).

Использовались образцы изготовленные из стали 12Х18 в форме квадрата размером 30х30 мм толщиной 3 мм. С помощью шлифовально-полировального станка и дисков с зернистостью (Р2500, Р1200, Р800, Р600, Р320) сформировано пять текстур. Трехмерные параметры шероховатости установлены с помощью профилометрического комплекса “Micro Measure 3D station” [1]. Статические контактные углы определены на установке с использованием теневого оптического метода [1], при дозировании капли дистиллированной воды на поверхность объёмом (10 мкл).

Проведен анализ трехмерных характеристик шероховатости (рисунок 1). Для описания текстуры поверхностей выбраны 3D параметры шероховатости: высотные (Sa – среднее арифметическое высоты; Sxp – высота предельных выступов) и гибридные (Sdq – приращение среднего квадратичного отклонения; Sdr – приращение относительной площади поверхности).

Параметр Sa дает представления об общих амплитудных свойствах поверхности, не позволяя различать выступы и углубления. Но с его помощью удобно сравнивать поверхности, полученные одним методом обработки. Полированная поверхность характеризуется Sa=0,04 мкм. После абразивной обработки Sa растет. Малые значения Sxp позволяют сделать вывод о том, что текстура поверхности состоит из низких и широких пиков, что обеспечивает большую площадь контакта и, следовательно, меньшие значения контактных углов. Относительное изменение площади поверхности на ее изучаемом участке относительно номинальной площади Sdr. Образцу 1 (полированный) соответствует Sdr = 0,1%. Для образцов 2-6 значение Sdr растет, т.к. увеличивается пространственная сложность текстуры. Sdq используют в основном для оценки качества поверхностей уплотнений, поверхностей с особыми требованиями к их смачиванию различными жидкостями, анализа характеристики их отражающей поверхности и внешнего вида (блеска). Sdq можно считать мерой гладкости поверхности, что согласуется с результатами: для наиболее гладкой (полированной) Sdq = 0,04, для самой шероховатой – 0,13.

На рис. 2 представлена зависимость статического угла от среднего арифметического отклонения профиля.

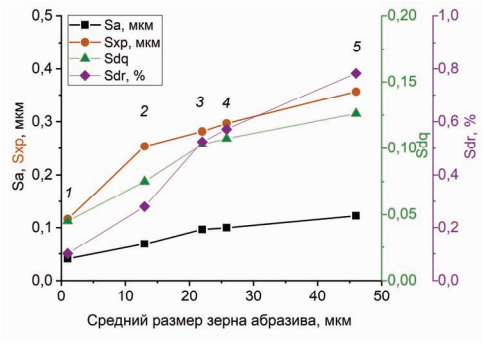


Рис. 1. Параметры шероховатости. Образцы, обработанные абразивной бумагой:1 – Р2500; 2 – Р1200; 3 – Р800; 4 – Р600; 5 – Р320.

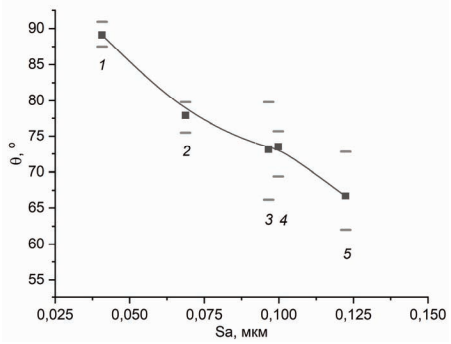


Рис. 2. Зависимость статического угла от среднего арифметического отклонения профиля. Образцы, обработанные абразивной бумагой:1 – Р2500; 2 – Р1200; 3 – Р800; 4 – Р600; 5 – Р320.

Из рис.2 видно, что с увеличением шероховатости поверхности, оцененной параметром Sa, статический контактный угол уменьшается, что согласуется с уравнением Венцеля-Дерягина [1].

Список литературы

1. Kuznetsov G.V., Feoktistov D.V., Orlova E.G., Zykov I.Y., Islamova A.G. Droplet state and mechanism of contact line movement on laser-textured aluminum alloy surfaces // J. Colloid Interface Sci. 2019. V. 553. P. 557–566.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90136

УДК 620.92, 544.6

ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ДИФФУЗИИ ВОДОРОДА В СИСТЕМЕ ЩЕЛОЧНОЙ ЭЛЕКТРОЛИТ-МЕТАЛЛОГИДРИДНЫЙ МАТЕРИАЛ

Казаков А.Н.[1], Бодиков В.Ю.[2], Блинов Д.В.[1,2], Володин А.А.[1,3]

[1] Объединенный институт высоких температур РАН, Москва
[2] Национальный исследовательский университет МЭИ, Москва
[3] Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка

e-mail: kazakoffalex09@gmail.com

С момента коммерциализации Ni-MH аккумуляторов в начале 1990-х ведутся непрерывные исследования различных интерметаллических соединений (ИМС) на возможность их использования в качестве анодного материала в электрохимических системах хранения энергии. ИМС для анодных материалов можно представить общей формулой $A_mB_nH_x$, где A – металл, образующий стабильный бинарный гидрид (La, Ce, Mm, Ti, Zr, V, Mg), а металл B в обычных условиях с водородом не взаимодействует (Ni, Co, Fe, Mn, Cr, Al и другие). В зависимости от соотношения металла A к металлу B ИМС можно классифицировать в нескольких основных типах: AB_5, AB_2, $AB_{3\text{-}3.5}$, AB, A_2B, твердые растворы внедрения Ti, V. Характеристики каждого типа сплавов в значительной степени отличаются по водородной емкости, разрядной емкости, активации и стабильности из-за различного состава и кристаллической структуры [1].

Важнейшими электрохимическими характеристиками материалов, применительно к Ni-MH аккумуляторам, являются максимальная емкость заряда (C_{max}), производительность при высоких плотностях тока (HRD), циклическая стабильность и легкость активации [2].

Одной из важных характеристик электродного материала является кинетика переноса водорода из электролита в объем ИМС и обратно. В процессе сорбции водорода из-за пространственных затруднений при заполнении пустот в кристаллической структуре ИМС диффузия водорода является определяющим фактором. Однако, на границе электролит-металлогидрид протекает различные процессы, такие как межфазный перенос, миграция водорода в подповерхностный слой, диффузия водорода в объеме и фазовый переход из α-твердого раствора в β-гидрид ИМС, что в значительной степени усложняет измерение эффективного коэффициента диффузии водорода [3].

Целью данной работы является исследование процессов массопереноса водорода в системе щелочной электролит – металлогидридный материал методами малоамплитудного потенциостатического прерывистого титрования.

Серия ИМС AB_5 типа на основе $La_{0.8}Ce_{0.2}Ni_4Co_{0.5}Mn_{0.3}Al_{0.2}$ с частичным замещением La на Nd, Ni и Co на Al, Cr для улучшения электрохимических свойств были приготовлены методом дугового плавления в аргоновой атмосфере с последующим отжигом при 1223 К. Кристаллическая структура и фазовый состав отожженных образцов были определены методом рентгеновской дифракции на дифрактометре Bruker's D8 ADVANCE с медным излучением. Электрохимические измерения проводились в стандартной трех-электродной ячейке с 6М раствором КОН в качестве электролита и ртуть-оксидным электродом сравнения. В качестве противоэлектрода использован коммерчески доступный $Ni(OH)_2$ с заведомо большей емкостью. Для активации металлогидридного электрода проведено 10 циклов заряда при плотности тока 100 мА/г в течение 4.5 часов и последующего разряда при той же плотности тока до потенциала 0.6 В. Время релаксации между зарядом и разрядом электрода составляло 0.5 часа.

Метод потенциостатического прерывистого титрования заключается в последовательном наложении ступеньки потенциала ΔE -20 мВ в диапазоне -0.84 – -0.98 В с последующим фиксированием изменения тока во времени до достижения минимального значения тока на каждом шаге. Для расчета эффективного коэффициента диффузии водорода использовано модифицированное уравнение Коттрела (1):

$$\frac{1}{I\sqrt{t}} = \frac{R_\Sigma}{\Delta E\sqrt{t}} + \frac{l\sqrt{t}}{\Delta Q\sqrt{D}} \qquad (1)$$

где, R_Σ – сумма всех недиффузионных сопротивлений в системе, ΔQ – интегральный заряд электрода при заданном потенциале, l – длина.

Скорость активации для всех исследуемых образцов достаточно высокая. Максимальная емкость электродов в 305-325 мАч/г достигается на 3-5 цикл активации, что обусловлено высокой каталитической активностью используемых ИМС.

В начальной стадии поглощения водорода из щелочного электролита при степенях заряда до 20% наблюдается большие значения эффективного коэффициента диффузии водорода в ИМС порядка 10^{-8}-10^{-9} $см^2/с$, которые достаточно хорошо согласуются с литературными данными. По мере насыщения α-твердого раствора и фазового перехода в β-гидрид ИМС наблюдается резкое уменьшение коэффициента диффузии водорода, что связано с заполнением энергетически выгодных пустот в кристаллической структуре ИМС. Коэффициенты диффузии водорода, соответствующие двухфазной области α + β на 2-3 порядка ниже, чем в начале процесса сорбции водорода.

Список литературы

1. Tliha M. et al. Kinetic and thermodynamic studies of hydrogen storage alloys as negative electrode materials for Ni/MH batteries: a review. Journal of Solid State Electrochemistry. 2014. V. 18(3). P. 577–593.
2. Ouyang L. et al. Progress of hydrogen storage alloys for Ni-MH rechargeable power batteries in electric vehicles. A review. Materials Chemistry and Physics. 2017. V. 200(C). P. 164–178.
3. Volodin, A.A. et al. Hydrogen diffusion in La1.5Nd0.5MgNi9 alloy electrodes of the Ni/MH battery. Journal of Alloys and Compounds. 2015. V. 645. P. S288-S291.

Работа поддержана РНФ (грант № 17-79-20413)

УДК 538.953

НАГРЕВ МАССИВА УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК ПРЕДЕЛЬНО КОРОТКИМИ ОПТИЧЕСКИМИ ИМПУЛЬСАМИ

Конобеева Н.Н., Белоненко М.Б.

Волгоградский государственный университет

e-mail: yana_nn@volsu.ru

Обладая исключительными свойствами, углеродные нанотрубки (УНТ) имеют широкий спектр применений в качестве электротермических пленок, композитов, датчиков и др. Отличная теплопроводность пленок УНТ обеспечивает высокую скорость нагрева и однородное распределение температуры с высокой оптической прозрачностью [1], таким образом они являются превосходными нагревательными элементами. С другой стороны, большое внимание привлекают их сильно нелинейные электродинамические свойства, в том числе взаимодействие с предельно короткими лазерными импульсами (ПКИ) с длительностями, соответствующими нескольким периодам колебаний поля [2], что позволяет применять их в качестве болометров [3].

Целью данной работы является исследование нагрева УНТ под действием предельно короткого оптического импульса. В рамках модели горячих электронов рассмотрен массив углеродных нанотрубок, который облучается электромагнитной волной с интенсивностью излучения порядка 2 ТВт/см^2. Фотовозбужденные электроны поглощают энергию данной волны вследствие процессов внутризонного и межзонного поглощения. В общем случае поглощенная энергия выделяется в виде джоулева тепла, которое зависит только от компоненты тока, находящейся в фазе с электрическим полем, и поэтому определяется действительной частью проводимости.

Учтем, что линейная проводимость углеродных нанотрубок имеет три компоненты: внутризонную электронную σ^e, внутризонную дырочную σ^h и межзонную σ_{in} [4], и запишем только их действительные части:

$$\sigma(\omega)=\sigma^e(\omega)+\sigma^h(\omega)+\sigma_{in}(\omega),$$

$$\sigma^e(\omega)=\frac{e^2 g_s g_v}{16\pi\hbar^2 k_B T}\int_0^\infty \frac{\gamma\varepsilon d\varepsilon}{\omega^2+\gamma^2}\frac{1}{\mathrm{ch}^2\left(\frac{\varepsilon-\mu_e}{2k_BT}\right)},$$

$$\sigma^h(\omega)=\frac{e^2 g_s g_v}{16\pi\hbar^2 k_B T}\int_0^\infty \frac{\gamma\varepsilon d\varepsilon}{\omega^2+\gamma^2}\frac{1}{\mathrm{ch}^2\left(\frac{\varepsilon+\mu_h}{2k_BT}\right)}, \qquad (1)$$

$$\sigma_{in}(\omega)=\frac{e^2 g_s g_v (16\pi\hbar)^{-1}\cdot \mathrm{sh}\left(\frac{\hbar|\omega|-(\mu_e-\mu_h)}{2k_BT}\right)}{\mathrm{ch}\left(\frac{\mu_e+\mu_h}{2k_BT}\right)+\mathrm{ch}\left(\frac{\hbar|\omega|-(\mu_e-\mu_h)}{2k_BT}\right)}$$

здесь $\gamma=1/\tau$, τ – время релаксации электронов в углеродных нанотрубках, e – заряд электрона, g_s, g_v – факторы спинного и долинного вырождения, μ_e, μ_h – химические потенциалы электронов и дырок соответственно, ω – частота электромагнитного излучения, ε – энергетический спектр УНТ, T – температура, k_B – постоянная Больцмана.

Далее следуя закону Джоуля-Ленца вычислим количество теплоты Q при протекании электрического тока через массив углеродных нанотрубок:

$$Q=\int_0^t I^2 R\cdot dt, \qquad (2)$$

где I – сила тока, R – сопротивление, $t \ll \tau$.

Силу тока найдем согласно формуле:

$$I(t)=\frac{L}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty}\sigma(\omega)\cdot E(\omega)\cdot e^{i\omega t}d\omega, \qquad (3)$$

где $\sigma(\omega)$ определяется согласно формуле (1), $E(\omega)$ – фурье-образ напряженности электрического поля импульса, причем $E(t)=c^{-1}\partial A/\partial t$, c – скорость света, A – векторный потенциал электрического поля, L – длина нанотрубки.

Изучено влияние формы предельно короткого оптического импульса на количество выделяемой теплоты (см. рис. 1).

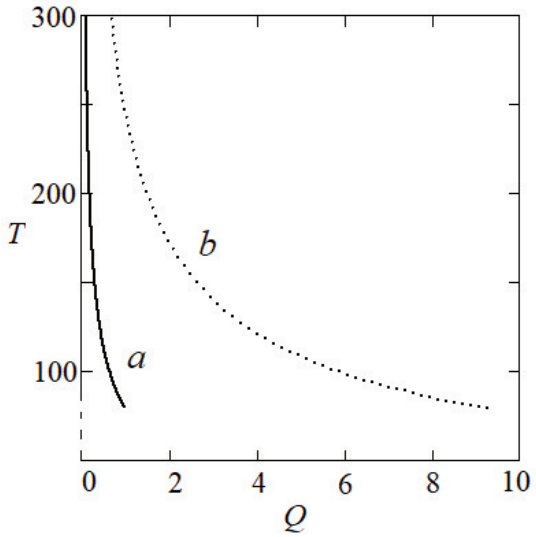


Рис. 1. Зависимость температуры от количества выделяемой теплоты: a) «световая пуля»; b) импульс Гаусса.

Список литературы

1. Hu J., Zou R., Sun Y. et al. Excellent field emitters: onion-shaped tipped carbon nanotubes // J. Phys. Chem. C. 2010. V. 114. P. 8282–8286.
2. Zheltikov A.M. Microstructure optical fibers for a new generation of fiber-optic sources and converters of light pulses // Phys. Usp. 2007. V. 50. P. 705–727.
3. Tarasova M., Svensson J., Weis J. et al.. Carbon nanotube based bolometer // JETP Lett. 2006. V. 84. No. 5. P. 267–270.
4. MIkhailov S.A. Quantum theory of the third-order nonlinear electrodynamic effects of graphene // Phys. Rev. B. 2016. V. 93. P. 085403.

Работа поддержана Минобрнауки РФ в рамках гос.задания (проект № 0633-2020-0003)

УДК 536.24

ТЕРМОКАПИЛЛЯРНЫЙ РАЗРЫВ И ДИНАМИКА КОНТАКТНОЙ ЛИНИИ В НАГРЕВАЕМЫХ СЛОЯХ ЖИДКОСТИ

Кочкин Д.Ю.[1,2], Зайцев Д.В.[1]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
[2] Новосибирский государственный технический университет

e-mail: kochkin1995@mail.ru

Физические механизмы разрыва пленки жидкости на твердой поверхности на сегодняшний день недостаточно изучены. Отчасти, это связано с большим количеством параметров системы жидкая пленка-подложка, от которых зависит этот процесс.

Рабочий участок (рис. 1) представляет собой текстолитовое основание, в центре которого впрессован медный стержень круглого сечения диаметром 12 мм, снизу к стержню прикреплен керамический нагреватель, подключенный к источнику тока. По периметру осуществляется охлаждение рабочего участка с помощью охладительного контура, по которому циркулирует вода заданной температуры. На рабочий участок устанавливается подложка. В качестве подложки использовался полированный диск из нержавеющей стали диаметром 51 мм и толщиной 1 мм. Морфология поверхности определялась сканирующим электронным микроскопом (HITACHI S3400N) и атомно-силовым микроскопом (Solver Pro NT MDT), угол смачивания измерялся с помощью прибора DSA100 Krüss GmbH. В качестве рабочей жидкости используется сверхчистая вода Milli-Q.

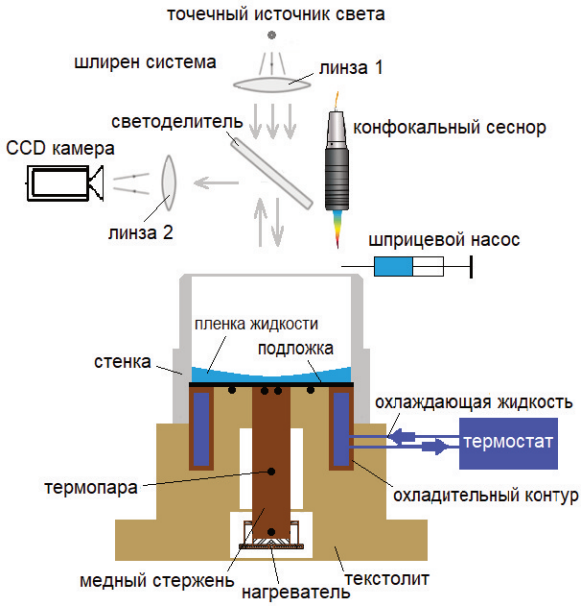


Рис. 1. Схема рабочего участка.

В эксперименте использовались скоростная камера Photron FASTCAM (3000 fps) с оптической шлирен системой, позволяющая визуализировать деформации и разрушение пленки, а также конфокальный сенсор Micro-Epsilon, позволяющий с высокой точностью измерять толщину слоя жидкости.

На рисунке 2 представлена зависимость пороговой температуры, при которой происходит разрыв, от толщины слоя жидкости. С увеличением толщины слоя пороговая температура увеличивается.

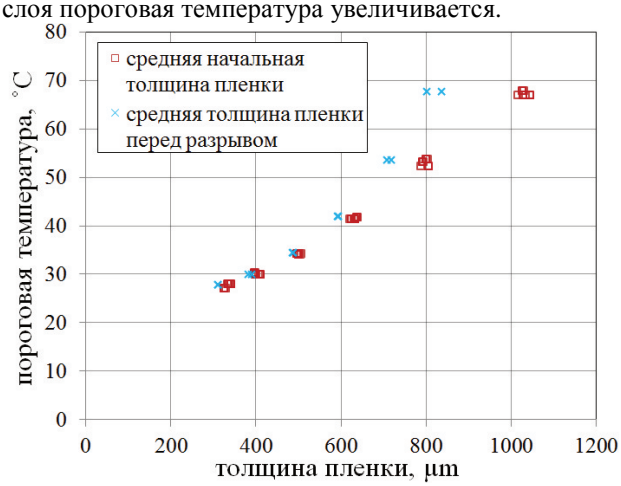


Рис. 2. Зависимость пороговой температуры от толщины слоя жидкости.

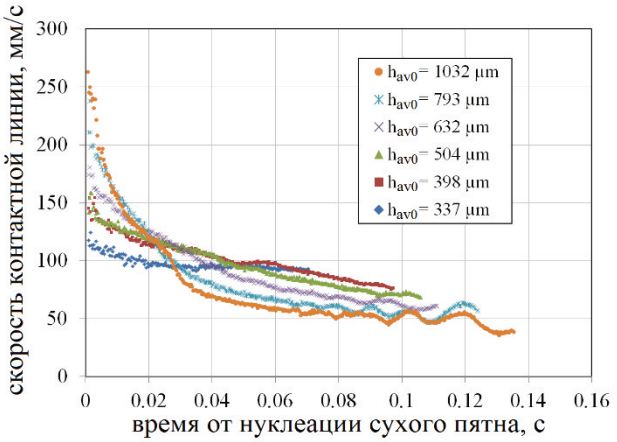


Рис. 3. Скорость контактной линии для разных начальных толщин пленки жидкости.

Скорость контактной линии (рис. 3) в процессе роста сухого пятна автоматически определялась с помощью анализа изображений в программном пакете Image J. Из анализа рисунка 3 следует, что скорость контактной линии максимальна в начальный момент роста сухого пятна. С увеличением начальной толщины слоя жидкости, скорость контактной линии в начальный момент роста сухого пятна увеличивается. По всей видимости, это связано с тем, что термокапиллярный разрыв более толстых слоев жидкости происходит при большей пороговой температуре, что вызывает большие касательные напряжения.

Работа поддержана РНФ (грант № 19-19-00695)

УДК 532.5

ОСОБЕННОСТИ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В Т-ОБРАЗНОМ ЭЛЕМЕНТЕ ПРИ МАЛЫХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СООТНОШЕНИЯ ВХОДНЫХ РАСХОДОВ

Кравцова А.Ю., Кашкарова М.В., Янко П.Е., Бильский А.В., Кравцов Ю.В.

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

e-mail: kravtsov60@mail.ru

Для повышения производительности микроразмерных безмембранных элементов Т-конфигурации важно исследовать различные режимы течения, в том числе, при изменении соотношения входных расходов реагентов. Целью работы является установление особенностей течения жидкости в Т-образном устройстве при малых числах Рейнольдса в зависимости от соотношения входных расходов.

Исследования гидродинамики течения проведены на экспериментальной установке Института теплофизики СО РАН. Рабочий канал представляет собой Т-образный микроканал, выполненный из оптически прозрачного материала SU-8 с размерами 120×120×240 мкм. Расход во впускных каналах обеспечивается шприцевым насосом. Перемешивание в микроканале достигается изменением соотношения расходов на входе. Поскольку геометрия Т-микроканала симметрична, предполагаем, что расход жидкости в левом входном канале (Q_1) меньше входного правого расхода (Q_2): $Q_1 < Q_2$. Соотношение расходов на входе определяется как соотношение R: $R = Q_1 / Q_2$. Число Рейнольдса определено как $\mathrm{Re} = U_0 D_\mathrm{h} / \nu$ для канала смешения, где D_h – гидравлический диаметр канала; U_0 – среднерасходная скорость потока в нем; ν – кинематическая вязкость потока, величина которой принимается в зависимости от комнатной температуры. Гидравлический диаметр выходного канала составляет 160 мкм. Исследование проводилось в диапазоне чисел Re в выходном канале от 3 до 186. Для визуализации режимов течения использовался метод лазерной индуцированной флуоресценции (LIF) [1, 2]. Эффективность перемешивания рассчитывалась на основе полученных мгновенных полей концентрации LIF-методом, используя выражение [3]:

$$I_M = 1 - \sigma/\sigma_0$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(c_i - \bar{c})^2$$

$$\sigma_0^2 = \bar{c}(c_{\max} - \bar{c}),$$

где I_M – значение эффективности перемешивания, σ_0^2 – соответствует максимальному среднеквадратичному отклонению смешения жидкости с концентрациями 0 и $c_{\max}$, $c_{\max}$ – максимальная концентрация красителя родамин 6G. Таким образом, жидкости полностью перемешиваются, тем самым достигается максимальная производительность элемента, при I_M=1, жидкости разделены при I_M=0.

Измерение скорости течений проводилось методом цифровой трассерной визуализации (PIV), с использованием двухимпульсного Nd: YAG-лазера (длина волны 532 нм, длительность импульса 10 нс, энергия импульса 25 мДж), CCD-камеры (глубина цвета 8 бит, разрешение матрицы 2048×2048 пикселей) и синхронизирующего процессора. Во время измерения PIV-система управлялась с помощью программы “ActualFlow”. При проведении измерений методом PIV в поток жидкости добавлялись трассерные частицы, покрытые флуоресцентным красителем (средний размер 2 мкм).

Для каждого набора экспериментальных условий собрано 5000 пар двойных изображений. Поля скоростей вычислялись с использованием итерационного кросс-корреляционного алгоритма с непрерывным сдвигом и деформацией окна и 50% – ным перекрытием окон. Подпиксельная интерполяция пика кросс-корреляции проводилась по трем точкам с использованием одномерной аппроксимации гауссовой функцией. Для большого динамического диапазона размер начальной расчетной области соответствовал 32 х 128 пикселям. Фильтрация рассчитанных векторов скорости происходила в два этапа: валидация по соотношению сигнал/шум с порогом 2, адаптивная медианная фильтрация с размером области 7×7.

Частичное проникновение потока в противоположный входной канал с появлением вихревых структур получено для $R \leq 0{,}12$. Вращение вихрей вокруг своих осей во входном канале приводит к неустойчивости течения в выходном канале, не оказывая значительного влияние на смешение. При $R > 0{,}12$ возникает полосчатая структура, поток в выходном канале является стационарным. Для Re = 186 эффективность смешения равна 0,4 для R = 0,21 и 0,86 для R = 1.

В случаях эффективного перемешивания отмечены большие значения продольных составляющих пульсаций скорости потока: до 0,6–0,8 в пристеночной части канала. При малых числах Re профиль продольной составляющей средней скорости потока на расстоянии $1D_\mathrm{h}$ от входа в канал смешения является асимметричным при R = 0,21; максимальные значения этой составляющей достигаются со стороны входного канала с Q_1 $2{,}84U_0$ для Re = 47. При $R \leq$ 0,12 указанная составляющая может характеризоваться отрицательными значениями со стороны канала с Q_1, что связано с образованием застойной зоны вблизи передней части выходного канала.

Список литературы

1. Dankwerts P.V. The definition and measurements of some characteristics of mixtures. Appl. Sci. Res. 1952. P. 279–296.
2. Kravtsova A.Yu., Ianko P.E., Kashkarova M.V., Bilsky A.V. Estimation of the flows mixing efficiency inside T-micromixer with an external perturbation for low Reynolds numbers. J. of Physics: Conference Series. 2019. V. 6. P. 1382.
3. Kravtsova A.Yu., Ianko P.E., Kashkarova M.V., Bilsky A.V. Investigation of the perturbation flow in a T-microchannel using the LIF technique. J. of visualization, 2019. V. 22(5). P. 851–855.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10217)

УДК 536.6

ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕХАНОХИМИЧЕСКИ АКТИВИРОВАННЫХ ГУМИНОВЫХ КИСЛОТ БУРОГО УГЛЯ

Мамылов С.Г., Скрипкина Т.С.[1], Тихова В.Д.[2], Бычков А.Л.[1], Ломовский О.И.[1]

[1] Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск
[2] Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова СО РАН, Новосибирск

e-mail: skripkina.t.s@gmail.com

Бурый уголь является широко используемым топливом как в России, так и за рубежом. В последние годы бурый уголь все чаще подвергается предварительной механической и механохимической активации для улучшения термических свойств, таких как температура и скорость воспламенения, выход летучих и др [1]. При механохимической активации бурого угля наибольшие изменения претерпевают гуминовые кислоты [2], представляющие собой нерегулярный полифенольный полимер с широким набором кислородсодержащих групп. Превращения в окислительной среде определяет поведение ГК в природе, при сжигании угля в качестве топлива. Термическое разложение в нейтральной среде моделирует нахождение ГК при хранении без доступа воздуха.

Целью настоящей работы является исследование термического разложения гуминовых кислот (ГК) на уровне выделения отдельных стадий и определения термохимических параметров, изучение влияния механохимической активации на эти стадии.

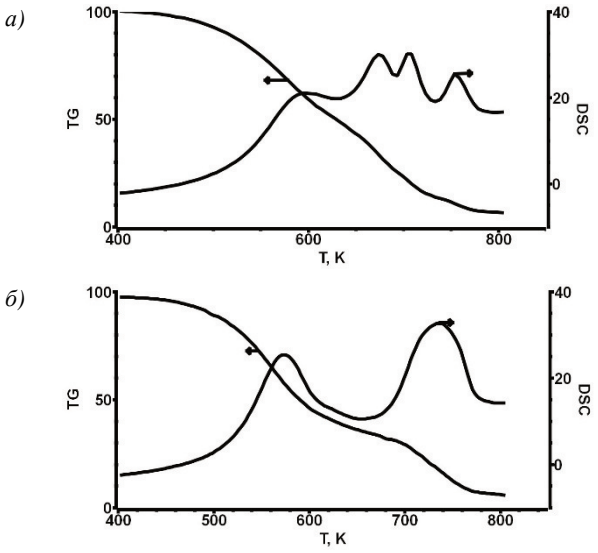


Рисунок 1. ТГ- и ДСК-кривые термолиза образцов гуминовых кислот: а – окислительная атмосфера, б – нейтральная атмосфера (направление «экзо» – вверх).

Гуминовые кислоты бурого угля были подвергнуты механической активации в присутствии воздуха (МА ГК) в лабораторной механохимической мельнице-активаторе планетарного типа АГО-2 при ускорении мелющих тел 20 и 40 g. Термический анализ гуминовых кислот проведен на термоанализаторе STA 409 PC Luxx (Netzsch) в синхронном режиме, который позволяет одновременно регистрировать потерю массы, определять характеристические температуры и тепловые эффекты. Разложение проводили как в атмосфере воздуха, так и в инертной атмосфере.

На ДСК кривых (см. рис. 1) исходных гуминовых кислот можно отметить, что примерно до 600 K в окислительной атмосфере заметны четыре экзопика, тогда как в нейтральной среде их число сокращается до двух. При терморазложении в окислительной атмосфере МА ГК также заметны четыре стадии с тепловыми эффектами. Для всех стадий определенны значения энергии активации для термического разложения и тепловые эффекты (см. таб. 1).

Таблица 1. Энергии активации и тепловые эффекты термического разложения образцов гуминовых кислот в окислительной атмосфере.

Образец	Ea, кДж·моль$^{-1}$	Q, кДж·г$^{-1}$	Tmax, K
Исходные ГК	61.7	7.84	578
	153.3	5.80	674
	362.7	2.26	709
	441.6	1.85	757
МА ГК	59.2	8.67	586
	231.2	5.78	643
	497.0	1.67	663
	386.9	2.35	747

Выбранный диапазон температур (примерно до 550–600 K) в окислительной атмосфере характеризуется выделением в качестве продуктов воды и окислов углерода при термическом разложении ГК. Считается, при этом происходит деструкция боковых структурных элементов и повышение степени конденсированности ядра. При переходе в нейтральную атмосферу термолиза величины тепловых эффектов нивелируются до незначительных величин.

Обнаружено влияние механохимической активации на стадийность процесса термолиза гуминовых кислот бурого угля. Для каждой выявленной стадии рассчитана энергия активации. Предложена интерпретация химических процессов на отдельных стадиях. Изменения в стадийности термолиза связаны с нахождением различных кислотных групп в кислой или солевой форме.

Список литературы

1. Burdukov A.P., Butakov E.B., Kuznetsov A.V.,& Chernetskiy M.Y. Deactivation of mechanically activated micronized coal // Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2018. V. 54. No. 1. P. 20–23.
2. Skripkina T.S., Bychkov A.L., Tikhova V.D., & Lomovsky O.I. Mechanochemical Solid-Phase Reactions of Humic Acids from Brown Coal with Sodium Percarbonate. Solid Fuel Chem. 2018. V. 52. No. 6. P. 356–360.

Работа поддержана РФФИ (грант № 18-29-24028)

УДК 621.9

СПОСОБ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ В ВИДЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ТАБЛИЦ

Рамазанов Э.Р.[1,2], Косой А.А.[1,3]

[1] Объединенный институт высоких температур РАН, Москва
[2] Российский Университет Дружбы Народов, Москва
[3] Московский Энергетический институт, Москва

e-mail: christmas071@gmail.com

Поиск способов сокращения выбросов CO_2 в атмосферу привел к новым термодинамическим циклам, в которых кислород выделяется из воздуха до горения, в камеру сгорания подаются топливо, чистый кислород и какие-нибудь рециркулирующие вещества от которых легко отделить CO_2, образовавшийся при сгорании топлива [1]. Чаще всего в качестве рециркулирующих газов используют CO_2, или H_2O, или их смесь. Параметры для таких циклов выбирают такие, что рабочее тело в отдельных точках цикла может быть жидким, или газообразным, или в сверхкритическом состоянии. Состав рабочего тела тоже переменный. В отдельных точках это чистые вещества, а в других смесь. Для расчетного исследования таких циклов требуется удобное описание теплофизических свойств веществ, которые могут входить в состав рабочего тела, в широком диапазоне параметров. Исследованию теплофизических свойств различных веществ уделялось большое внимание. Все вещества, которые могут входить в состав рабочего тела новых циклов, хорошо изучены в достаточных диапазонах изменения параметров. Теплофизические свойства большинства веществ можно найти в справочной литературе в табличной форме. Для построения этих таблиц имеются аппроксимирующие системы уравнений, базирующиеся на экспериментальных данных. Но расчетные исследования предполагают множество итерационных циклов с многократными обращениями к теплофизическим свойствам. Системы уравнений слишком громоздкие и требуют слишком много вычислений, чтобы использовать их в итерационных циклах. Табличная форма требует преобразование справочных таблиц в форму, приемлемую для обработки вычислительной техникой. При исследованиях термодинамических циклов традиционных газотурбинных установок широко использовалось представление теплофизических свойств компонент рабочего тела полиномами различной степени, но такой подход приемлем тогда, когда во всей области исследований все компоненты рабочего тела по свойства близки к идеальному газу. Если цикл охватывает и области вблизи фазовых переходов, то зависимости свойств становятся такими сложными, что описанию простыми полиномами не поддаются.

Целью предлагаемой работы была разработка информационного массива и вычислительного модуля (электронной таблицы), описывающих зависимость основных теплофизических свойств различных веществ. Этот модуль предназначен для программно-вычислительного комплекса, моделирующего энергетические установки, выполненные по бескомпрессорному циклу.

В основе предлагаемого способа лежит метод замены переменных. Исходные зависимости $Z = f(P,T)$, где Z – вектор описываемых параметров (теплоемкость, энтальпия, энтропия, …); P – давление; T – температура, преобразуются в зависимости $Z = f(X,Y)$, где $X = \ln(P/P_{кр})^n$; $Y = \ln(T/T')^m$; $P_{кр}$ – давление в критической точке; T' – температура фазового перехода (если давление выше критического, то температура в критической точке); n и m – показатели определяющие густоту сетки. Такие преобразования позволяют при равномерных сетках в координатах X–Y получать разумную разрежённость сетки в координатах P–T там, где изменение свойств имеет характер близкий к линейному и обеспечивать приемлемую густоту, там, где зависимости далеки от линейных. В области фазового перехода (Y=0) для устранения неопределенности появляется еще одна переменная – степень сухости пара.

Предлагаемый способ представления теплофизических свойств и вычислительный модуль (электронная таблица) предназначены для использования в программно-вычислительном комплексе, моделирующем энергетические установки, выполненные по бескомпрессорному циклу. На данный момент уже сформирован и протестирован информационный массив, описывающий следующие вещества: CO_2, H_2O, O_2 и CH_4. В широком диапазоне изменения давлений и температур (от 600 Па до 600 МПа и от 70 К до 2000 К соответственно) отклонения значений, описываемых свойств, от исходных справочных таблиц не превышает 1%. Этот диапазон полностью удовлетворяет требования поставленной задачи. Дальнейшая работа будет направлена на расширение номенклатуры описываемых веществ.

Список литературы

1. Kosoi A.S., Zeigarnik Yu.A., Popel' O.S., Sinkevich M.V., Filippov S.P., Shterenberg V.Ya. The Conceptual Process Arrangement of a Steam-Gas Power Plant with Fully Capturing Carbon Dioxide from Combustion Products // Thermal Engineering. V. 65. P. 597–605.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-19-00558)

УДК 621.9

УЛУЧШЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛОГИДРИДОВ С ПОМОЩЬЮ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПАКТОВ

Романов И.А., Борзенко В.И., Казаков А.Н.

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

e-mail: romanoff_i_a@mail.ru

Хранение водорода – это ключевая технология, позволяющая развивать экономику, основанную на водороде и топливных элементах. Водород имеет наивысшую плотность энергии на единицу массы среди всех топлив, однако, его низкая объемная плотность при комнатной температуре и атмосферном давлении приводит к довольно низкой плотности энергии на единицу объёма. Использование металлогидридов для хранения водорода позволяет одновременно получить высокую волюметрическую и гравиметрическую ёмкости, хорошую кинетику абсорбции и десорбции водорода и термодинамику реакции.

Материалы, подходящие для твёрдо фазного хранения водорода должны удовлетворять специфическим требованиям для того чтобы они могли быть использованы в разработке основанных на водороде технологий хранения энергии. Эти материалы должны сохранять свои свойства в области кинетики взаимодействия и ёмкости даже после длительного циклирования, однако, на практике порошки имеют склонность к агломерации, что снижает эффективность системы. Одно из возможных решений этой проблемы, которое было успешно проверено для систем на основе Mg [1,2], это компактизация гидридных порошков в пеллеты повышенной плотности. Изготовление компактов из порошков гидридов обычно производится в цилиндрической форме после смешивания со специальными добавками для улучшения теплопроводности и механической стабильности (например, Al, Cu или углеродными материалами). К преимуществам формирования компактов можно отнести то, что такие материалы могут более безопасно обрабатываться и менее склонны к деградации из-за загрязнения влагой и кислородом воздуха. С другой стороны, высокая плотность компакта может привести к замедлению диффузии водорода через образец, ухудшению кинетики реакции и изменению PCT-изотерм абсорбции/десорбции водорода.

В литературе есть данные, что компактизированные системы имеют тенденцию к дисагрегированию по мере циклирования, возвращаясь к исходному состоянию свободного порошка [3]. Поэтому проблема стабильности металлогидридных компактов тоже является актуальной.

Цель данной работы – изучить влияние методики изготовления и различных добавок при формировании металлогидридного компакта на теплопроводность образца и его водородсорбционные свойства.

Детали эксперимента Металлогидридные компакты изготавливались на основе активированного порошка интерметаллического соединения AB_5-типа на основе $LaNi_5$ состава $LaNi_{4.4}Al_{0.3}Fe_{0.3}$ с низким равновесным давлением абсорбции и десорбции водорода (менее 0.1 МПа при комнатной температуре). Порошок интерметаллида с добавкой углеродных нано волокон или в чистом виде тщательно распределялся внутри матрицы из пено-материалов на основе Ni или Cu, которые одновременно повышают теплопроводность и механическую стабильность образца. В качестве пресс формы для изготовления компактов использовался стальной рабочий сосуд установки для измерения PCT-изотерм УС-150. Степень компактизации образцов контролировалась за счет измерения хода штока пресса. Сосуд с образцом подключался к контрольно-измерительной системе установки и помещался в жидкостной термостат, после чего, с помощью подачи или отбора калиброванных порций водорода происходило измерения PCT-изотерм абсорбции и десорбции водорода, соответственно. Температура внутри образцов измерялась с помощью термопары, расположенной по оси рабочего сосуда в 3 мм от дна. Сравнение профилей температуры внутри различных образцов в ходе абсорбции и десорбции водорода было использовано для оценки улучшения их теплопроводности по сравнению со свободно засыпанным порошком исходного металлогидрида.

В результате проведенных исследований обнаружено, что металлогидридные компакты обладают заметно лучшей теплопроводностью по сравнению со свободной засыпкой порошка, при этом их водородсорбционные свойства отличаются незначительно (увеличивается угол наклона плато, снижается равновесное давление). Теплопроводность растет с увеличением плотности компакта, однако, образцы с максимальной степенью компактизации показали ухудшение кинетики абсорбции и десорбции водорода и снижение максимальной емкости. Проведенные исследования показали, что использование металлогидридных компактов является перспективной технологией хранения водорода.

Список литературы

1. Chaise A., de Rango P., Marty P., Fruchart D., Miraglia S., Olivès R. et al. Enhancement of hydrogen sorption in magnesium hydride using expanded natural graphite. Int J Hydrogen Energy. 2009. V. 34. P. 8589–8596.
2. Khandelwal A., Agresti F., Capurso G., Lo Russo S., Maddalena A., Gialanella S. et al. Pellets of MgH2-based composites as practical material for solid state hydrogen storage. Int J Hydrogen Energy. 2010. V. 35. P. 3565–3571.
3. Jepsen J., Milanese C., Girella A., Lozano G.A., Pistidda C., Bellosta von Colbe J.M. et al. Compaction pressure influence on material properties and sorption behaviour of $LiBH_4$–MgH_2 composite. Int J Hydrogen Energy. 2013. V. 38. P. 8357–8366.

Работа поддержана РНФ (грант № 17-19-01738)

УДК 536.24

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОЖИДКОСТНОГО ТЕЧЕНИЯ В ЩЕЛЕВОМ МИКРОКАНАЛЕ

Роньшин Ф.В., Дементьев Ю.А.

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

e-mail: f.ronshin@gmail.com

В последние два десятилетия, фактически происходит революционное развитие теплообменных систем с мини-, микро- и наноразмерами, и эти системы оказываются гораздо более энергоэффективными, чем макросистемы с размерами каналов 3–100 мм. Величина отводимых тепловых потоков в создающихся мини- и микротеплообменниках может достигать 1000 Вт/см^2 и более. Также в последние несколько лет происходит интенсивное развитие 3D чипов, где необходимо отводить тепло непосредственно из области чипа. Наиболее перспективным решением охлаждения представляется использование микроканалов, которые подводятся внутрь чипа, непосредственно к тепловыделяющему элементу. При этом поперечные размеры микроканала связаны с размерами чипа. Для анализа возможности создания таких систем необходимо иметь информацию о формировании режимов газожидкостного течения в коротких широких (щелевых) микроканалах. Оптимизация работы системы охлаждения обеспечивается подбором соответствующих расходов жидкости и газа и режима течения с наибольшим коэффициентом теплоотдачи. Однако, в литературе отсутствуют систематические данные по исследованию формирования режимов течения в щелевых микроканалах.

В настоящей работе проведены экспериментальные исследования газожидкостных течений в микроканалах высотой 56-164 мкм и шириной 10 мм. Исследованы режимы двухфазного течения, перепад давления, а также истинное газосодержание. Для исследования взаимодействия жидкости и газа, для регистрации пленок жидкости на нижней и верхней стенках канала и, соответственно, для определения локального газосодержания была разработана методика анализа изображения. Полученные шлирен-методом изображения были обработаны с использованием разработанного алгоритма в Matlab®, который позволяет получить локальное газосодержание и другие количественные характеристики. Алгоритм подробно описан в работе [1].

Основные характеристики двухфазного потока исследованы экспериментально в широком диапазоне приведенных скоростей газа и жидкости. Для определения газосодержания экспериментально получены 114 точек в диапазоне приведенных скоростей U_{SG} от 0,67 до 23,3 м/с и приведенных скоростей жидкости U_{SL} от 0,03 до 0,42 м/с. Приведенные скорости жидкости и газа определялись как отношение объемного расхода к площади поперечного сечения микроканала. В исследуемом диапазоне наблюдаются все характерные режимы потока для щелевых микроканалов: пузырьковый, струйный, вспененный, кольцевой и раздельный. Подробное описание режимов течения представлено в [1]. Используя разработанный алгоритм, были получены значения истинного газосодержания для каждого режима течения в зависимости от времени. Затем полученные данные были усреднены по большому периоду времени (частота видеосъемки составляла 60 Гц, продолжительность видеосъемки составляла около 120 секунд для каждой точки). Таким образом, было получено усредненное по времени истинное газосодержание.

Проведено сравнение полученного истинного газосодержания α и расходного газосодержания β с корреляциями [2-4]. Показано хорошее качественное совпадение с корреляцией Xiong и Chung [2], разработанной для круглого канала с гидравлическим диаметром 100 мкм. На рис. 1 показано сопоставление экспериментальных данных с корреляциями. Таким образом, можно сделать вывод, что корреляции, разработанные для прямоугольных и круглых каналов с Т-образным смесителем, качественно описывают поведение газосодержания в щелевом микроканале с плавным смесителем. Линейная корреляция Арманда [4], разработанная для горизонтальных круглых каналов с гидравлическим диаметром ~ 1 мм, не описывает поведение газосодержания в щелевом микроканале.

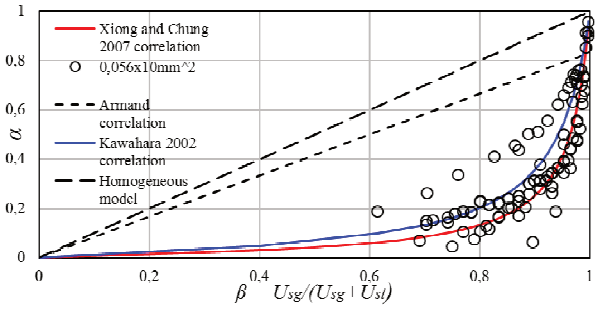


Рис.1. Особенности режимов течения в мини- и микроканалах.

Список литературы

1. Ronshin F., Chinnov E. Experimental characterization of two-phase flow patterns in a slit microchannel // Experimental Thermal and Fluid Science. 2019. V. 103. P. 262–273.
2. Xiong R., Chung J. N. An experimental study of the size effect on adiabatic gas-liquid two-phase flow patterns and void fraction in microchannels // Physics of Fluids. 2007. V. 19. No. 3. P. 033301.
3. Kawahara A., Chung P. M. Y., Kawaji M. Investigation of two-phase flow pattern, void fraction and pressure drop in a microchannel // International journal of multiphase flow. 2002. V. 28. No. 9. P. 1411–1435.
4. Armand A. A. The resistance during the movement of a two-phase system in horizontal pipes // Izvestiia Vsesoiuznyi Teplotekhnicheskii Institut. 1946. V. 1. P. 16–23.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (соглашение № 19-79-00256)

УДК 544.03

ИСТОЧНИКИ ДАННЫХ О ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Савченко И.В.

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

e-mail: savchenko@itp.nsc.ru

Теплофизические свойства являются важнейшими физическими характеристиками веществ и материалов, необходимыми при выполнении тепловых расчетов при проектировании устройств и установок. Сложно переоценить важность этих параметров для задач энергетики, металлургии, машиностроения и многих других отраслей промышленности.

Информация о свойствах веществ может содержаться в различных источниках, и может быть получена разными способами. При этом данные из различных источников могут существенно отличаться, как качественно и количественно, так и по форме представления данных. Например в отчетах могут содержаться первичные данные экспериментов, включая записи сигналов измерительных датчиков. Такая информация крайне ценна, располагая ей можно выполнить ревизию точности полученных результатов, оценить и проанализировать погрешности, уточнить результаты обработав первичные данные используя более совершенную расчетную модель, возможно даже извлечь дополнительную информацию о свойствах исследуемого материала путем более внимательного анализа. В научных статьях найти подобную первичную информацию вряд ли получится. В лучшем случае приводятся примеры сигналов в качестве иллюстрации для какой-то одной экспериментальной точки. Также, в статьях часто можно обнаружить таблицы с экспериментальными точками, хотя многие журналы и авторы предпочитают публиковать только аппроксимационные зависимости или даже графики с результатами. В обзорах, справочниках и базах данных информация содержится уже в агрегированном виде, порой бывает проблематично выяснить происхождение тех или иных данных.

С другой стороны, при создании лабораторных отчетов часто не уделяется должного внимания осмыслению полученных результатов. Такие документы имеют прежде всего архивную функцию, позволяют сохранить первичную экспериментальную информацию и вернуться к ее осмыслению и обработке в любое удобное время. Данные публикуемые в статьях уже обработаны и осмыслены коллективом авторов. Более того, поскольку научные журналы, как правило рецензируются, публикуемые данные получают положительную экспертную оценку еще и от рецензента. Информация публикуемая в справочниках, обзорах, и базах данных, отбирается еще более тщательно. Прежде чем сформулировать свои рекомендации составители справочников тщательно анализируют все доступные источники информации, изучают возможности современных теоретических и прогностических подходов в этой области, практику использования тех или иных данных в инженерных задачах, часто выполняется совместный анализ информации о нескольких взаимосвязанных свойствах, для того чтобы получить непротиворечивые рекомендации. Интегрируя таким образом в справочных данных всю известную информацию о материале. Конечно такой глубокий анализ выполняется не всегда, при создании разных справочников и обзоров авторы преследуют разные цели, и выбирают различные стратегии отбора данных. Тоже самое может относится и к другим источникам информации, исследователи обрабатывают и представляют результаты так как считают правильным.

Выбор наиболее подходящих источников данных о теплофизических свойствах конкретного материала представляется достаточно сложной задачей, учитывая всю разнородность этих источников, каждый из которых обладает своими достоинствами и недостатками. Еще более сложной задачей является сформулировать универсальные рекомендации для человека столкнувшегося с таким выбором.

Настоящая работа представляет из себя краткий эскизный обзор наиболее популярных источников информации о теплофизических свойствах, в котором, отражены их сильные и слабые стороны, особенности, обозначены пути их развития в современном быстро меняющемся мире. С одной стороны, целью работы является привлечение внимания профессионального сообщества к вопросу о наиболее подходящем способе публичного обмена информацией о свойствах и вовлечение в дискуссию максимального количества заинтересованных лиц. Особую актуальность этот вопрос приобретает в свете активного развития интернет-сервисов предназначенных для сбора, хранения и обработки данных о свойствах материалов. С другой стороны, знакомство с обзором позволит человеку столкнувшемуся с проблемой поиска надежных данных по теплофизическим свойствам, корректно сформулировать задачу, оценить свои возможности и ресурсы для ее решения, понять с чего начать и в каком направлении двигаться.

Изложенные в докладе тезисы, и рассуждения являются частным, субъективным мнением, а затронутые вопросы, требуют широкого обсуждения.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН (АААА-А17-117022850029-9) и проекта РФФИ № 15-38-20223

УДК 621.039.5//544.35.03

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ РАСТВОРОВ БОРНОЙ КИСЛОТЫ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К АВАРИЙНОМУ ОХЛАЖДЕНИЮ ВВЭР

Сахипгареев А.Р., Шлепкин А.С., Морозов А.В.

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского», Обнинск

e-mail: asakhipgareev@ippe.ru

При анализе особенностей функционирования системы пассивного залива активной зоны (СПЗАЗ) современных АЭС с реакторной установкой ВВЭР возникла задача исследования теплофизических свойств высококонцентрированных растворов борной кислоты (H_3BO_3).

Учитывая длительное (до 72 ч) аварийное охлаждение активной зоны ВВЭР за счет работы СПЗАЗ и поступления конденсата из парогенераторов, работающих в конденсационном режиме [1], а также кипение теплоносителя и малое содержание борной кислоты в паровой фазе, возможна её кристаллизация в реакторе. Известно, что предел растворимости H_3BO_3, при котором начинается её выпадение в осадок, зависит от температуры теплоносителя. В аварийной ситуации с разрывом главного циркуляционного трубопровода давление в первом контуре будет находиться в диапазоне 0,2-0,5 МПа [1], при этом предельная концентрация борной кислоты в активной зоне будет составлять несколько сотен г/кг раствора (см. рис. 1).

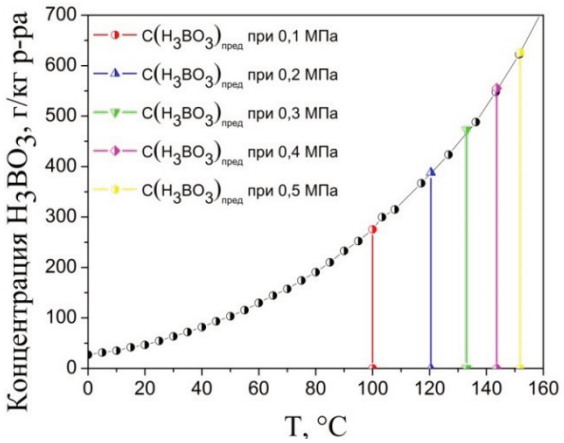


Рис. 1. Кривая растворимости борной кислоты
$C(H_3BO_3)$ – концентрация кислоты,
$C(H_3BO_3)_{пред}$ – предельное значение.

Для выполнения расчетного моделирования аварийной ситуации на АЭС с ВВЭР необходимо знание теплофизических свойств борной кислоты, влияющих на процессы её накопления и кристаллизации в активной зоне. В литературе встречаются данные о свойствах водных растворов H_3BO_3, однако они охватывают ограниченный диапазон параметров (температура, давление, концентрация кислоты) [2, 3]. В связи с этим возникла необходимость проведения дополнительных экспериментальных исследований.

Опыты по определению теплофизических свойств (плотности и вязкости) борной кислоты были проведены в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» [4]. Полученные экспериментальные данные позволяют существенно расширить диапазон известных параметров растворов борной кислоты.

К теплофизическим свойствам веществ также относится поверхностное натяжение, знание которого необходимо для уточнения расчетных оценок величины капельного уноса борной кислоты. В процессе аварии вынос борной кислоты из реакторной установки с паром или вследствие капельного уноса может существенно снизить риск ее кристаллизации.

Следовательно, исследование коэффициента поверхностного натяжения H_3BO_3 σ имеет важное прикладное значение для расчетов аварийных режимов на АЭС с ВВЭР нового поколения, оснащенными пассивными системами безопасности. В связи с чем, в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» были проведены экспериментальные исследования поверхностного натяжения, в диапазоне концентраций 2,5-150 г/кг H_2O. Опыты проводились методом измерения усилия отрыва кольца Дю-Нуи от поверхности раздела фаз (жидкость-газ) на цифровом тензиометре DST 30. Была получена зависимость изменения коэффициента σ борной кислоты от её концентрации.

Полученные в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» опытные данные по теплофизическим свойствам, высококонцентрированных растворов могут быть использованы для уточнения результатов расчетов аварийных процессов в реакторной установке, проводимых как с использованием одномерных расчетных программ, так и трёхмерных CFD-кодов.

Список литературы

1. Морозов А.В., Ремизов О.В. Экспериментальное обоснование проектных функций дополнительной системы пассивного залива активной зоны реактора ВВЭР // Теплоэнергетика. 2012. № 5. С. 22–27.
2. Yassin A. Hassan, Serdar Osturk, Saya Lee. Rheological characterization of buffered boric acid aqueous solutions in light water reactors // Progress in Nuclear Engineering. 2015. Vol. 85. P. 239–253.
3. Аванесян А.С., Ахундов Т.С. Экспериментальное исследование коэффициента динамической вязкости водных растворов борной кислоты // Препринт АН АрмССР. Ереван, 1980. 20 с.
4. Питык А.В., Сахипгареев А.Р., Шлепкин А.С., Морозов А.В. Теплофизические свойства водных растворов борной кислоты в широком диапазоне концентраций // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2018. № 3. С. 102–114.

Работа поддержана РНФ (грант № 16-19-10649)

УДК 538.911

ПЕРЕНОС ГРАФЕНА С МЕДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА КРЕМНИЕВЫЕ ПОДЛОЖКИ

Смовж Д.В.[1], Костогруд И.А.[1], Морозова М.А.[1], Бойко Е.В.[2]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
[2] Новосибирский государственный университет

e-mail: smovzh@itp.nsc.ru

В настоящее время наиболее перспективным методом производства графеновых материалов является СВД рост на поверхности различных металлических подложек. Важным преимуществом СВД метода является его масштабируемость. Например, в [1,2] предложены технологии непрерывного синтеза графеновых покрытий на медной фольге с использованием установок рулонного типа. Однако большинство современных приложений графеновых материалов требуют перенос графена с металлической подложки на подложки с заданными оптическими и диэлектрическими свойствами. К наиболее популярным и апробированным методам относятся технологии переноса через различные полимеры. В работе проведено сравнение методов переноса однослойного графенового покрытия с использованием технологии ПММА и с помощью термоадгезивной ленты на монокристаллические кремниевые подложки с естественным слоем SiO_2 и оценены перспективы их использования для образцов большой площади.

Синтез графена проводился в трубчатой печи, с использованием в качестве источника углерода метана на медной поверхности, при атмосферном давлении, методика подробно описана в [3].

Перенос на ПММА производился методом спинкоатинга. ПММА растворялся в ацетоне в весовом соотношении 1:10, после чего капля раствора наносилась на поверхность меди покрытой графеновым слоем. Далее медный образец раскручивался ускорением 300 об/с2 до 1500 об/мин и выдерживался при 1500 об/мин 1 минуту. После чего образец останавливался, и процедура нанесения повторялась еще дважды.

После нанесения полимерного слоя образец прогревался до температуры 190 □C, для предотвращения отслаивания полимера (или нет?) после чего медь стравливалась в 40% растворе азотной кислоты. Образец промывался в дистиллированной воде.

Композит ПММА-графен помещался в обезгаженной дистиллированной воде на кремниевую подложку, далее производилась сушка при температуре 60 °C, в течение одного часа, после чего кремниевая пластинка прогревалась до 190 □C. Удаление ПММА производилось растворением в ацетоне с последующей промывкой в дистиллированной воде.

При переносе с использованием термоадгезивной ленты, с ленты Revalpha 3198LS удалялся защитный слой, она приклеивалась к графеновой поверхности, после чего происходило удаление меди по идентичной ПММА процедуре. Композит термоадгезив-графен помещался на кремниевую подложку и прогревался до температуры 120 □C, при прогреве происходило отслоение ленты от поверхности.

В результате переноса получены образцы однослойного графена на монокристаллических кремниевых подложках с естественным оксидным слоем с отношением 2D/G=1,5 и FWHM составляет 31 $см^{-1}$ (см. рис. 1).

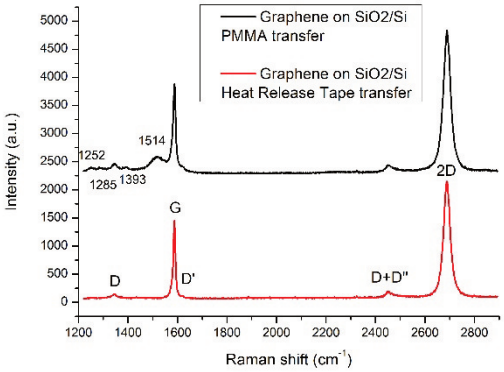


Рис. 1. КР спектры однослойного графена на монокристаллических кремниевых подложках с естественным оксидным слоем.

Проведено исследование сплошности переносимого покрытия и качество графеновой пленки после переноса. Проведен анализ вносимых при переносе загрязнений графеновой поверхности. Показано, что использование для переноса однослойного графена с меди на полимер термоадгезивной ленты более предпочтительно, в связи с тем, что отсутствуют дополнительные загрязнения, возникающие в результате термодеструкции ПММА с остатками ацетона на воздухе при прогреве образцов. Термическое расширение ПММА при прогреве приводит к возникновению зазоров между кристаллами в графеновой пленке. Перенос с использованием ПММА может использоваться для получения локальных областей перенесенного графена с масштабом порядка размера медного зерна. При этом наиболее предпочтительно при переносе через ПММА в качестве растворителя при нанесении использовать анизол.

Список литературы

1. Kobayashi T. et al. Production of a 100-m-long high-quality graphene transparent conductive film by roll-to-roll chemical vapor deposition and transfer process // Appl. Phys. Lett. 2013. V. 102 P. 023112.
2. Polsen E. S. et al. High-speed roll-to-roll manufacturing of graphene using a concentric tube CVD reactor // Sci. Rep. 2015. V. 5. P. 10257.
3. Smovzh, D.V. et al. Joule heater based on single-layer graphene // Nanotechnology. 2020. Accepted Manuscript https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab8ded.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН и проекта РФФИ №18-29-19099\19

УДК 532, 519.6

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В МИКРОКАНАЛАХ С ГИДРОДИНАМИЧЕСКИМИ ЛОВУШКАМИ

Фаткуллина Н.Б., Солнышкина О.А., Булатова А.З.

Центр микро- и наномасштабной динамики дисперсных систем,
Башкирский государственный университет, Уфа

e-mail: nazgulbay1999@gmail.com

В настоящее время во многих областях науки и промышленности актуальной проблемой является применение новых эффективных технологий, которые могут быть разработаны на основе фундаментальных исследований в области микрогидродинимики. Трёхмерное моделирование стоксовых течений вязкой жидкости в микроканалах с гидродинамическими ловушками имеет значение для микрогидродинамики, например, при создании лабораторий-на-чипе, которые активно применяются в медицине, биофизике и фармакологии. Основным их преимуществом является малое количество реагентов или образцов, необходимых для проведения реакций и аналитических процессов. Результаты исследований гидродинамических потоков в подобных сложных областях могут применяться при конструировании микрофлюидных устройств для отделения или фиксации частиц в потоке. Влияние геометрии структур в микроканалах активно исследуется как с экспериментальной, так и с теоретической точки зрения.

В данной работе проведено численное изучение гидродинамических потоков вокруг элементов гидродинамических ловушек внутри плоского микроканала с прямоугольным поперечным сечением, возникающих при медленном течении вязкой несжимаемой жидкости под действием заданного постоянного объемного расхода. Все процессы рассматривались для малых чисел Рейнольдса (Re<1) и при изотермических условиях. Такие течения описываются стационарными уравнениями Стокса. На поверхности всех неподвижных элементов задавалось условие прилипания.

Моделирование производилось с помощью программных модулей на основе ускоренного метода граничных элементов. Преимуществом метода граничных элементов является его эффективность при решении трёхмерных задач со сложной геометрией или в бесконечных областях. Все расчёты связаны только с границей элементов, которые покрываются треугольной сеткой. Для изучения динамики капель при течении вязкой жидкости вокруг гидродинамических ловушек рассматривались капли различных размеров, а также широкий диапазон капиллярных чисел и соотношений вязкостей жидкости внутри капли и снаружи.

Разработана качественная триангуляция микроструктур с плоскими гладкими стенками со сложной геометрией, включающей в себя гидродинамические ловушки различной конфигурации. В частности, рассматривалась гидродинамическая ловушка подковообразной формы. Такая ловушка состоит из пяти цилиндрических элементов, радиусы которых равны. Исследовалась картина течения вязкой жидкости вокруг распределённых на различном расстоянии друг от друга гидродинамических ловушек подковообразной формы. Подковообразные гидродинамические ловушки часто используются в микрофлюидных устройствах для фиксации частиц в потоке.

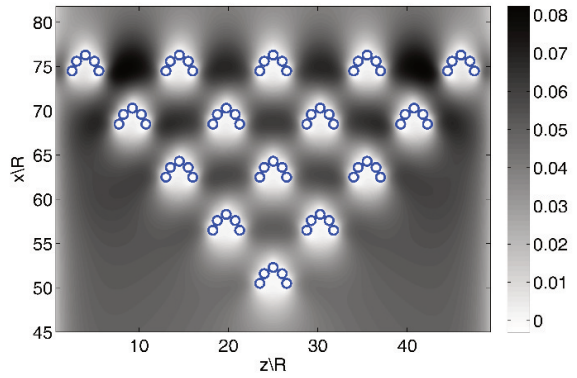


Рис. 1. Распределение продольной компоненты скорости для расстояния 6.4R между рядами гидродинамических ловушек.

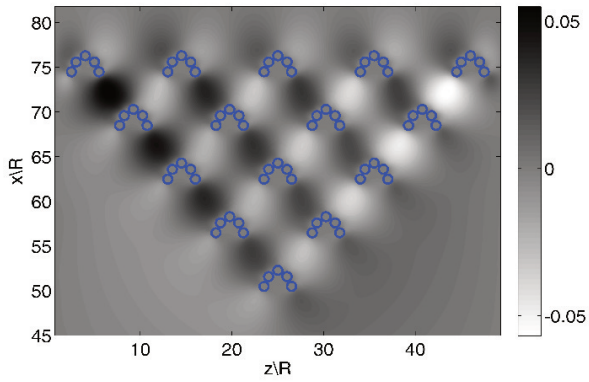


Рис. 2. Распределение поперечной компоненты скорости для расстояния 6.4R между рядами гидродинамических ловушек.

Изучено влияние расстояния между рядами ловушек на картину течения и распределения продольной (см. рис. 1) и поперечной (см. рис. 2) компонент скорости потока. Показано, что при изменении расстояния между рядами ловушек от минимального, равного половине радиуса элемента, до шести радиусов поле скоростей вокруг изменяется значительно, а при дальнейшем увеличений характерная картина течения сохраняется.

Библиотека FMM предоставлена Fantalgo, LLC (Maryland, USA).
Исследование проведено при финансовой поддержке гранта Президента РФ МК-549.2019.1.

УДК 536.63

ТЕПЛОЕМКОСТЬ ЖИДКОГО СПЛАВА $CS_{80}BI_{20}$ С ЧАСТИЧНО ИОННЫМ ХАРАКТЕРОМ МЕЖАТОМНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Хайрулин А.Р., Савченко И.В., Станкус С.В.

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

На концентрационных зависимостях электросопротивления [1] и термических свойств [2] жидких сплавов системы цезий-висмут обнаружены экстремумы в области 25 ат. % Bi, которые связывают с образованием ассоциатов с частично ионным характером межатомного взаимодействия. Наши измерения калорических свойств расплавов Cs-Bi также показали значительное превышение теплоемкости расплава $Cs_{72.9}Bi_{27.1}$ [3] над расчетами по законам идеальных растворов. Чтобы определить протяженность и форму данного максимума необходимо выполнить измерения в некоторой области концентраций вблизи 25 ат. % Bi. В связи с этим целью данной работы являлось измерение энтальпии сплава $Cs_{80}Bi_{20}$ в широкой области температур жидкого состояния.

Использовался изопериболический калориметр смешения [4] и герметичная ампула из стали 12Х18Н10Т. Компоненты сплава имели чистоту 99.94 мас. % (Cs) и 99.98 масс. % (Bi). Химический состав находился весовым методом и составил X_{Cs}=80.0±0.01 ат. %, молекулярная масса сплава составила 148.116 г/моль.

Температура начала кристаллизации расплава, определенная на подготовленной ампуле методом дифференциального термического анализа, проведенного непосредственно в печи калориметра, составила

$$T_L = 834 \pm 3 \text{ К},$$

что совпадает с результатами гамма-экспериментов [2], где проводился контроль гомогенности жидких образцов.

Результаты измерений (7 точек в интервале 859.0-1076.3 К) по инкременту энтальпии $Cs_{80}Bi_{20}$ обрабатывались методом наименьших квадратов степенными полиномами от температуры. Анализ полученных данных показал, что они хорошо описываются линейной зависимостью:

$$H_{298}(t) = 23927 + 38.08\ t,$$

где $H_{298}(T)$ – изменение энтальпии при нагреве от 298.15 К до температуры T в Дж/моль, $t = T - 834$, T – в К. Среднеквадратическое отклонение точек от аппроксимационной зависимости составляет 19.5 Дж/моль или 0.065 % (рис. 1). Случайная погрешность аппроксимации (доверительная вероятность 95%) для энтальпии составила 20-38 Дж/моль или 0.07-0.15 %, для теплоемкости 0.7%. Общая погрешность энтальпии оценивается в 0.4 % или 120 Дж/моль, а теплоемкости в 1 %.

На рис. 1 также приведено относительное отклонение экспериментальных значений теплоемкости жидкого сплава $Cs_{80}Bi_{20}$ от расчета C_p по законам для идеальных растворов. Видно, что отклонение теплоемкости уменьшается с ростом температуры, что может быть объяснено распадом комплексов с частично ионным характером межатомного взаимодействия. В то же время абсолютная величина δC_p существенно меньше таковой для сплава $Cs_{72.9}Bi_{27.1}$, где она достигает 55 % [3]. Это свидетельствует о резком сокращении вероятности образования ассоциатов с ионной связью при уменьшении концентрации висмута ниже 25 ат. %.

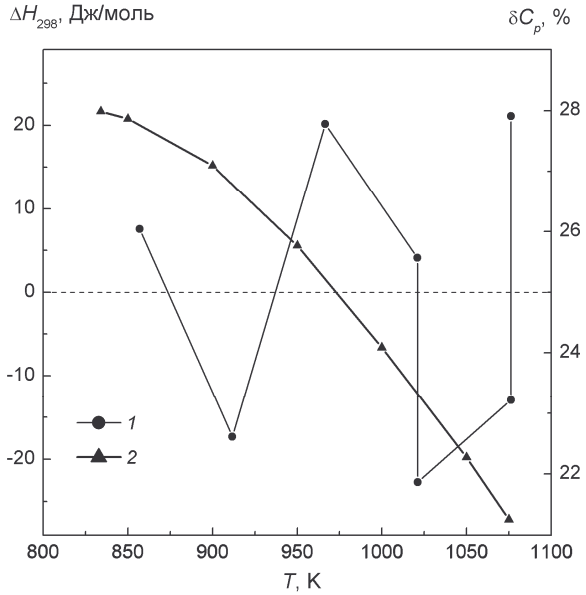


Рис.1. Отклонения измеренных значений инкремента энтальпии расплава $Cs_{80}Bi_{20}$ от аппроксимационного уравнения (1) и теплоемкости от расчетов по правилу аддитивности (2), $\delta C_p = [C_{p,exp} / C_{p,add} - 1] \times 100\%$.

Список литературы

1. Meijer J.A., van der Lugt W. Resistivity of Liquid K–Bi and Cs–Bi Alloys // J. Phys.: Condens. Matter. 1989. V. 1. P. 9779–9784.
2. Khairulin R.A., Abdullaev R.N., Stankus S.V. Volume contraction in liquid caesium–bismuth alloys // Phys. and Chem. Liquids. 2018. V. 58. No. 2. P. 143–149.
3. Stankus S.V., Savchenko I.V., Khairulin A.R., Yatsuk O.S. Enthalpy and heat capacity of $Cs_{72.9}Bi_{27.1}$ alloy with a partly ionic character of interatomic interaction in the condensed state // J. Phys.Conf. Series. 2019. V. 1382. Art. No. 012190.
4. 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.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10023) и гранта РФФИ (проект № 18-38-00070)

УДК 621.9

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В КАПЛЕ ЖИДКОСТИ НА ТОНКОЙ ФОЛЬГЕ

Чеверда В.В.[1,2], Пономаренко Т.Г.[1,2]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
[2] Новосибирский государственный университет

e-mail: t.evans2010@yandex.kz, slava.cheverda@gmail.com

В связи с интенсивным развитием электроники наблюдается увеличение транзисторов – закон Мура (количество транзисторов в одном процессоре будет увеличиваться вдвое каждые 2 года) [1]. В настоящее время процессоры изготавливаются по 7 нм технологии. Это приводит к увеличению тепловыделения с одного процессора. Двухфазная система охлаждения является перспективным решение проблемы охлаждения. Существует несколько разных систем: на основе кипения, плёночные, а также спрейные. Спрейная система охлаждения является перспективной при использовании в условиях с разным значением ускорения свободного падения [2]. Это связано с тем, что спрей можно направлять в любом направлении на охлаждаемую поверхность. В результате воздействия спрейного потока на нагреваемую поверхность на ней возникает тонкая плёнка жидкости с высоким коэффициентом теплоотдачи. Основным эффектом в данном случае является взаимодействие капли при падении с нагретой поверхностью. Ранее во время экспериментов по теплообмену одиночной покоящейся капли на нагретой тонкой фольге было показано локальное увеличение теплового потока в области контактной линии [3].

В данной работе исследуется теплообмен в тонкой металлической фольге при падении на неё капли жидкости. Для этого используется экспериментальная установка с нагреваемой константановой фольгой толщиной 25 мкм, длиной 80 мм и шириной 35 мм. Данная фольга подключается через латунные электроды к источнику питания TTi QPX 1200L. С нижней стороны фольги распределение температуры снимается с помощью ИК-камеры Titanium 570M (3,7 – 4,8 мкм). Капля воды заданного объёма падает с установленной высоты из иглы шприца с помощью насоса Cole-Parmer EW-74905-54. Высокоскоростная камера визуализирует процесс взаимодействия капли с нагретой фольгой.

Краевой угол смачивания фольги измерялся с помощью системы Kruss DSA-100. Измерен также гистерезис краевого угла смачивания (разница между наступающим и оттекающим углами смачивания). Для данной фольги гистерезис составляет порядка 90° (угол натекания 110°, а оттекания 20°).

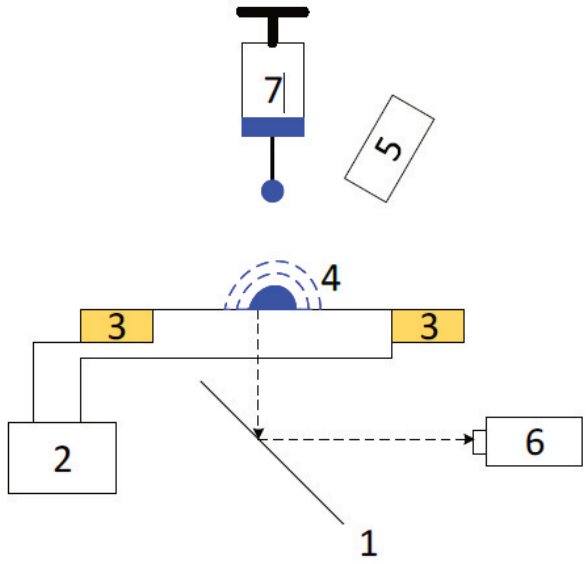


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки, где 1 – зеркало с золотым напылением, 2 – источник питания, 3 – латунные электроды с фольгой между ними, 4 – испаряющаяся капля жидкости после падения, 5 – видео камера, 6 – ИК-сканер Titanium 570M, 7 – шприц с жидкостью.

ИК-изображения в дальнейшем обрабатываются и используются для расчёта плотности теплового потока при испарении жидкости вблизи контактной линии. Для этого используется метод решения задачи Коши для эллиптического уравнения. Знания о плотности теплового потока в области микрорегиона (малая область слоя жидкости порядка несколько мкм в контактной линии смачивания) является перспективной задачей для создания высокоэффективной системы охлаждения на базе спрейной системы охлаждения.

Список литературы

1. Moore G.E. Cramming more components onto integrated circuits // Electronics Magazine. 1965. Vol. 38 (8). P. 114–117.
2. T. Gambaryan-Roisman, O. Kyriopoulos, I. Roisman, P. Stephan, C. Tropea, Gravity effect on spray impact and spray cooling // Microgravity Science and Technology. 2007. V. XIX(3/4). P. 151–154.
3. Cheverda V.V., Karchevsky A.L., Marchuk I.V., Kabov O.A. Heat flux density in the region of droplet contact line on a horizontal surface of a thin heated foil // Thermophysics and Aeromechanics. 2017. V. 24. P. 803–806.

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 18-19-00538

УДК 536.2

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ НА ПОВЕРХНОСТИ С МАКРО-, МИКРО- И НАНОРЕЛЬЕФОМ

Чугунков Д.В., Кузма-Кичта Ю.А., Сейфельмлюкова Г.А., Иванов Н.С.

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

e-mail: chugunkovdv@mpei.ru

Процесс конденсации широко распространен в технике, так как это очень эффективный метод отвода тепла. В зависимости от условий возникает плёночная или капельная конденсации. Коэффициент теплоотдачи при капельной конденсации намного больше, чем при плёночной конденсации. Однако получить устойчивый процесс капельной конденсации длительное время достаточно сложно.

В отдельных случаях более простым решением оказывается интенсификация теплообмена при плёночной конденсации на макро- и микромасштабах [1–3]. Для этого используются накатка и оребрение поверхности. В отличие от оребрения накатка позволяет интенсифицировать теплоотдачу как на наружной, так и внутренней поверхностях трубы.

При плёночной конденсации (рис.1) на наружной поверхности труб с канавками интенсификация теплообмена обусловлена действием поверхностного натяжения на плёнку конденсата.

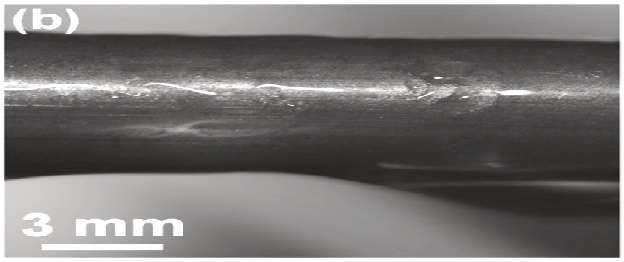


Рис. 1. Трубка с плёночной конденсацией пара.

Этот эффект усиливается при уменьшении относительного шага канавок, а также в случае волнового профиля трубы. Переменное сечение трубы с плавными переходами приводит к стеканию конденсата в канавки. В результате уменьшается толщина конденсатной пленки на выступах трубы и её термическое сопротивление. Стекание конденсата в канавки снижает устойчивость плёнки и приводит к её срыву, что ведёт к росту коэффициента теплоотдачи, который тем больше, чем больше глубина канавок, чем меньше их шаг и радиус закругления выступающих частей труб.

Пристенные турбулизаторы не только интенсифицируют теплоотдачу, но и уменьшают отложения на стенке.

Капельная конденсация имеет место в тех случаях, когда жидкость не смачивает поверхность теплообмена. Важную роль в возникновении капельной конденсации играет структура поверхности [2, 3].

Как видно на рис. 2, при реализации капельной конденсации стенка покрыта каплями различного размера. Поверхность между каплями покрыта ультратонкой плёнкой конденсата, имеющей очень малое термическое сопротивление. При капельной конденсации силы межмолекулярного сцепления (когезии) конденсата больше сил притяжения конденсата к поверхности. Благодаря действию сил межмолекулярного сцепления, жидкость стремится занять минимальный объём и принимает сферическую форму. Достигнув некоторого критического размера, капли под действием силы тяжести скатываются с поверхности, освобождая её для образования новых капель.

Капельная конденсация имеет место на поверхностях с относительно низкой поверхностной энергией. Для создания подобных поверхностей могут применяться различные технологии. Для получения капельной конденсации применяются тонкослойные металлоорганические соединения или полимерные покрытия с низкой поверхностной энергией. Капельная конденсация получена на алмазоподобных и ионно-легированных покрытиях на основе алюминия и меди.

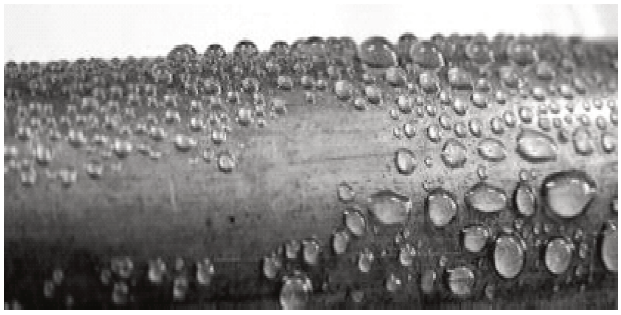


Рис. 2. Трубка с капельной конденсацией пара.

Прогресс нанотехнологий сделал возможным получение наноразмерных структур. Для получения капельной конденсации используются тефлон, перфтрооктан сульфонат, углеродистые нано-трубки и др. Также применяются методы химического и электрохимического осаждения и др.

Однако известные методы для получения капельной конденсации не обеспечивают её стабильности и их применение в технике проблематично. Поэтому актуальна разработка способов получения стабильных гидрофобных покрытий для реализации капельной конденсации в технике.

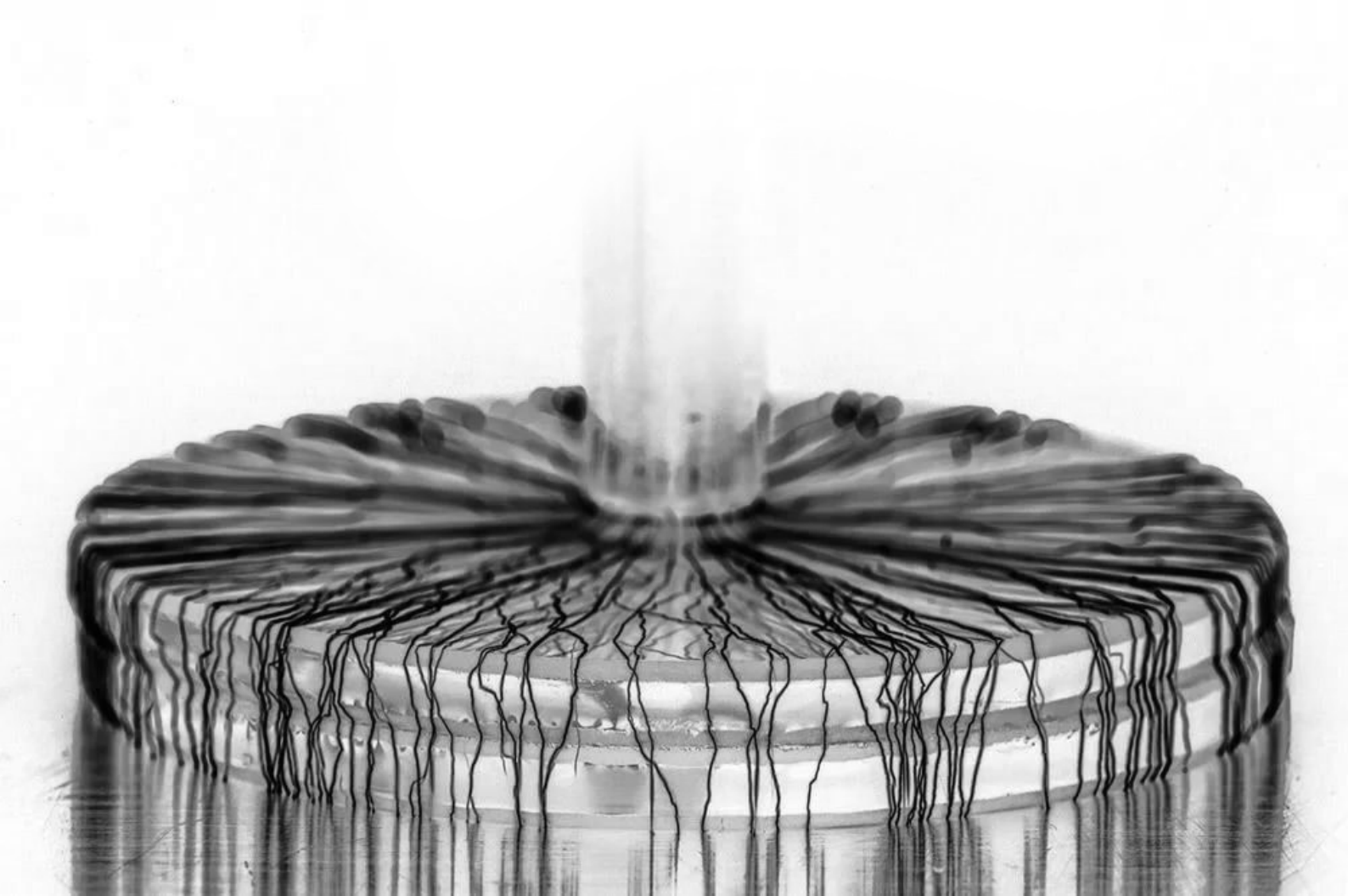
Список литературы

1. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Копп И.З., Мякочир А.С. Эффективные поверхности теплообмена. Энергоатомиздат.1998.
2. Yu. Kuzma-Kichta and A. Leontiev «Heat and Mass Tranfer Enhancement on Macro-, Micro-, and Nanoscales» Journal of Enhanced Heat Transfer. 2018. V. 25. No. 6: v-vi P. 465–565.
3. Дзюбенко Б.В., Кузма-Кичта Ю.А., Леонтьев А.И. и др. Интенсификация тепло- и массообмена на макро-, микро- и наномасштабах // Под. ред. Кузмы-Кичты Ю.А. М.: ФГУП ЦНИИАТОМИНФОРМ. 2008. 532 с.

Работа поддержана Минобрнауки России (Шифр научной темы FSWF-2020-0021)



СЕКЦИЯ 8
Электрофизические явления в газовых и жидких средах



УДК 537.868.3

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ С НЕФТЕМАТЕРИНСКИМИ ПОРОДАМИ

Зиннатуллин Р.Р., Султангужин Р.Ф.

[1]Башкирский государственный университет, Уфа

e-mail: rasulz@yandex.ru

При воздействии электромагнитных полей в широком диапазоне частот от 100 кГц и до 2,4 ГГц на нефтематеринские породы, в том числе и сланцы, содержащие кероген, происходит нагрев керогена. Нагрев нефтематеринских пород до температур в диапазоне 200–400°С и выдерживание их при данных температурах в течение определенного периода времени приводит к процессу пиролиза, в ходе которого из породы выделяется маловязкая нефть, газ и пар [1].

Кроме этого, воздействие электромагнитного поля на нефтематеринскую породу может привести к развитию в ней термоупругих напряжений, трещиноватости, разупрочнению и разрушению породы. Термические напряжения возникают в результате термического расширения породы при её неравномерном нагреве. Как известно, нефематеринская порода состоит из набора различных минералов: кварц, полевой шпат, слюда, которые ведут себя по-разному по отношению к электромагнитному нагреву из-за разности в их электрофизических параметров, чем и обуславливается неравномерный нагрев породы в целом [2–3].

Однако в зависимости от электрофизических свойств нефтематеринских пород электромагнитные поля разных частотных диапазонов могут с различной степенью воздействовать на породу [4–5].

Поэтому ключевым моментом является выбор эффективной частоты и мощности электромагнитного излучения применительно к конкретному объекту воздействия.

В качестве объектов исследования были выбраны образцы пород доманиковой и баженовской и свиты.

Диэлектрические параметры (относительная диэлектрическая проницаемость ε' и тангенс угла диэлектрических потерь $\mathrm{tg}\delta$) исследуемых образцов определялись на специальной установке с использованием куметров Е4-11 и ВМ-560, позволяющей проводить исследования в диапазоне частот 50 кГц – 300 МГц и температур 20–150°С.

Далее исследовалось влияние высокочастотного (ВЧ) и сверхвысокочастотного (СВЧ) электромагнитных (ЭМ) полей на исследуемые объекты. Для ВЧ ЭМ обработки использовался генератор ВЧД 2,5/13 с выходной мощностью 2,5 кВт и рабочей частотой 13,56 МГц. Обработка проводилась в специальном цилиндрическом конденсаторе. СВЧ ЭМ обработка проводилась в СВЧ печи мощностью 1 кВт и рабочей частотой 2,45 ГГц. Для теплоизоляции и предотвращения испарения легких фракций углеводородов образцы при обработке электромагнитными полями помещались внутрь фторопластовой ячейки.

В ходе проведения эксперимента определяется динамика изменения температуры образцов, и отмечаются наблюдаемые эффекты (начало трещинообразования, выделение углеводородных флюидов или воды и другие). Температура образцов в процессе воздействия электромагнитными полями определялась при помощи пирометра. После проведения эксперимента исследуется структура поверхности образцов с помощью оптического микроскопа.

Результаты исследований показали, что для исследуемых образцов интенсивность нагрева при воздействии СВЧ полем выше, чем при ВЧ воздействии более чем в 20 раз при одинаковой расходуемой энергии. При этом наиболее интенсивно при СВЧ воздействии нагревается образец баженовской свиты с минимальной потерей массы. Интенсивность нагрева – 516,6°С/мин при мощности 14,5 Вт/г. Образование трещин наблюдается у всех образцов в диапазоне 250-300 °С. При воздействии на образцы СВЧ полем наблюдалось выделение дыма со специфическим запахом.

На рис. 1. приведены фотографии микроструктуры поверхности образца №2 до и после воздействия СВЧ ЭМП.



Рис. 1. Фотографии микроструктуры образца №2 до и после СВЧ ЭМ воздействия.

Список литературы

1. Мартемьянов С.М. Моделирование подземного нагрева горючих сланцев :дис. 2013.
2. Менжулин М.Г., Соколова Н.В., Шишов А.Н. Наведенная трещиноватость, разупрочнение и разрушение скальных горных пород при СВЧ-нагреве //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2000. №. 8. 229 с.
3. Вороновский Ю.Д., Максименко А.Г., Долголаптев А.В., Нистратов В.Ф., Красновский С.С., Образцов А.П. & Уваров А.П. Разрушение крепких пород в массиве на основе комбинированных электрофизических способов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 1999. №. 3.
4. Ковалева Л.А., Зиннатуллин, Р.Р., Султангужин Р.Ф., Шрубковский И.И., Мясников А.В. Экспериментальные исследования нагрева нефтенасыщенных горных пород электромагнитным полем //Теплофизика высоких температур. 2017. Т. 55. №5. 858 с.
5. Зиннатуллин Р.Р., Ковалева Л.А., Султангужин Р.Ф. Исследование диэлектрических свойств водонефтенасыщенных горных пород и их нагрева в электромагнитном поле // Теплофизика высоких температур. 2019. Т. 57. №. 1. С.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-05-00535а

УДК 537.52

ЭЛЕКТРОИСКРОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ПЫЛЕВИДНЫХ ТОПЛИВ

Карзанов А.Н.[1], Беляев М.В.[1], Делягин В.Н.[2], Чернов В.А.[3], Лемешев О.П.[3], Елистратов С.Л.[3]

[1] ООО НТЦ «Системы Экологической Безопасности», Новосибирск
[2] Сибирский НИИ механизации и электрофикации сельского хозяйства, Новосибирск
[3] Новосибирский государственный технический университет

e-mail: elistratov.sl@yandex.ru

Современные энергетические и промышленные котлы должны удовлетворять самым высоким экологическим требованиям. При использовании в них пылевидных углеродсодержащих твердых топлив необходимо обеспечить условия их устойчивого воспламенения и горения. Для этих целей наряду с плазмотронами активно начинают использоваться энергосберегающие электроискровые технологии, обеспечивающие высокую полноту выгорания топлива.

В настоящей работе исследован один из возможных вариантов реализации этой технологии с использованием горючих отходов промышленного производства.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

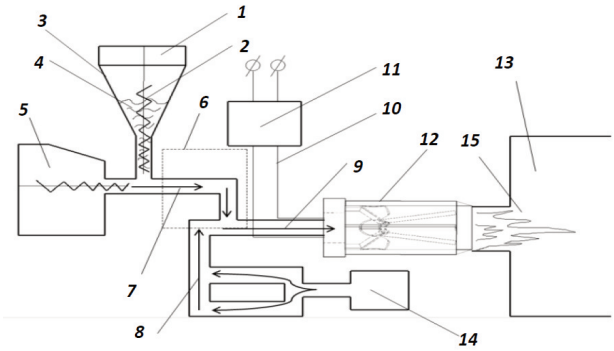


Рис. 1. Схема экспериментальной установки с системой электроискрового воспламенения. 1 – электродвигатель; 2 – шнек № 1; 3 – бункер угольной пыли; 4 – угольная пыль; 5 – шнек № 2; 6 – вибратор; 7 – труба подачи угольной пыли; 8 – узел подачи воздуха; 9 – трубопровод подачи воздушно-угольной смеси; 10 – высоковольтные кабели; 11 – источник тока; 12 – наружная кварцевая труба электроискрового блока; 13 – топливный котел; 14 – воздушный компрессор; 15 – пламя.

От источника питания *11* по кабелям *10* на стержневые электроды, установленные в электроискровом блоке *12*, подается переменный ток частотой 20 кГц. Смешанный топливно-воздушный поток *9*, проходя через электроискровую зону, воспламеняется в межэлектродной зоне ионизации воздуха. Система подачи воздуха состоит из воздушного компрессора *14* и двух каналов *8*, один из которых под прямым углом входит в другой для завихрения воздушного потока (рис. 2).

Конструкция электроискрового блока *12* обеспечивает направленную подачу топливно-воздушной смеси в зону искрообразования за счет применения специальных вставок. Это позволяет обеспечить высокие показатели полноты выгорания для углей различной степени метаморфизма, а также и промышленных углеродсодержащих отходов.

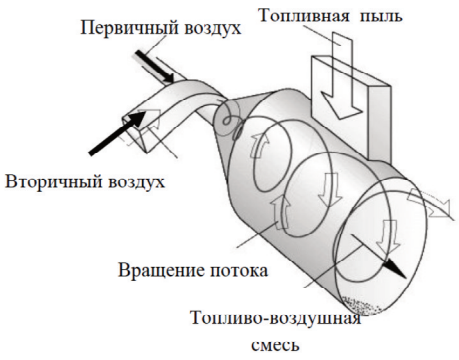


Рис. 2. Схема подачи топливно-воздушной смеси.

На холостом ходу (подача только воздуха без топлива) потребляемая мощность установки составляет 1,2 кВт, а температура на выходе из зоны ионизации на расстоянии 50 мм от края электродов составляет около 40°С. При подаче частиц топлива (рис.3) температура факела, измеренная оптическим пирометром на расстоянии 10 см от торцов электродов, составляла ~ 800°С.

В качестве топлива были использованы предварительно измельченные до 30…90 мкм промышленные отходы резиновой крошки. Расход топливной пыли через зону ионизации изменялся в пределах 15…20 г/с, что обеспечивало выделение тепловой энергии в размере ~ 0,3 МВт.

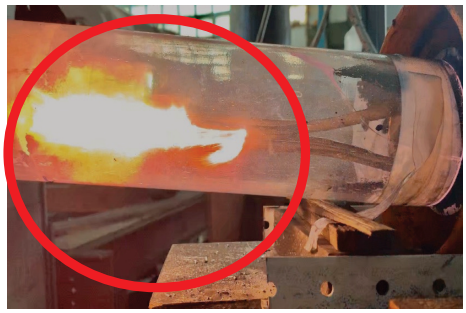


Рисунок 3. Зона воспламенения топлива.

Конструктивно за счет направленного завихрения пылевидного потока в межэлектродное пространство был реализован режим работы, обеспечивающий полноту сгорания топлива до ~ 95 %.

Сделан вывод о возможности использования электроискровой технологии как для розжига угольных котлов с использованием различных по составу твердых углеродсодержащих топлив, так и для подсветки в режиме постоянной работы горелок для увеличения полноты сгорания топлива.

УДК 537.528

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Коробейников С.М.[1,2], Ридель А.В.[1,2], Карпов Д.И.[1,3], Прокопенко Я.Г.[3]

[1] Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск
[2] Новосибирский государственный технический университет
[3] Новосибирский государственный университет

e-mail: karpov@hydro.nsc.ru

Исследование частичных разрядов в жидких диэлектриках имеет давнюю историю и, несмотря на это, остается важным направлением исследований в электрофизике. Практическая значимость этих исследований определяется двумя факторами. Во-первых, частичные разряды в форме незавершенных стримеров или разрядов в пузырьках в жидкости ведут к старению изоляции в электрических установках высокого напряжения, что существенно повышает вероятность пробоя изоляции и аварий, приводящих к выходу установок из строя. Во-вторых, регистрация интенсивности частичных разрядов является перспективным методом оценки состояния изоляции в действующих высоковольтных установках. Ранее было обнаружено [1, 2], что в условиях пониженного естественного радиационного фона вероятность инициирования разряда в пузырьках гелия в трансформаторном масле радикально снижается. Этот эффект объяснялся малым количеством или даже полным отсутствием начальных свободных зарядов в газе, способных инициировать электрический разряд в пузырьке.

В работе [3] впервые было показано, что нанотрубка может служить хорошим источником свободных электронов вследствие интенсивной инжекции с ее поверхности. В настоящей работе была предпринята попытка создать источник электронов путем добавления в трансформаторное масло углеродных нанотрубок.

Выполнены эксперименты по инициированию частичных разрядов в пузырьках, заполненных гелием, в трансформаторном масле. К плоским электродам, расположенным вертикально на расстоянии несколько миллиметров друг от друга, прикладывалось переменное напряжение промышленной частоты. В масло, заполнявшее межэлектродный промежуток, добавлялся в микроскопических концентрациях раствор нанотрубок компании OCSiAl [4] диаметром 1.6 нм и длиной не более 5 μм. В экспериментах пузырьки гелия всплывали в трансформаторном масле параллельно поверхностям электродов. После добавления нанотрубок в масло мы наблюдали два эффекта. Во-первых, при напряжениях, соответствующих напряжению Пашена пробоя газового промежутка, в пузырьках наблюдались частичные разряды, которых в отсутствие нанотрубок не было. То есть, в жидкости или на поверхности пузырька возникали свободные заряды, появление которых связано с наличием в диэлектрике нанотрубок. Пузырьки после разряда существенно деформировались и сильно осциллировали, что говорит об образовании электрических зарядов на их поверхности. Во-вторых, при более высоких напряжениях после разрядов пузырьки дробились электрическими силами на два или несколько более мелких пузырьков, иногда формируя небольшие пузырьковые кластеры. Движение пузырьков между электродами при их всплытии служило хорошим индикатором гидродинамических течений. При низком напряжении и очень малой концентрации нанотрубок движение пузырьков оставалось регулярным (вертикальным по почти прямой линии). При более высоких концентрациях нанотрубок возникали интенсивные гидродинамические течения между электродами, о чем свидетельствовала сложная траектория каждого из пузырьков, попавших в область течения. Эти течения наблюдались как при частичных разрядах, так и в их отсутствие. При относительно высоких концентрациях нанотрубок наблюдалось образование агломератов из них. Эти скопления, как правило, имели форму вытянутых вдоль линий напряженности электрического поля нитей, которые также были вовлечены в гидродинамические течения.

В настоящей работе также обсуждается возможная роль различных видов инжекции с поверхности нанотрубок в жидкость (трансформаторное масло). К таким видам инжекции относится непосредственно инжекция электронов из углерода, а также возможная инжекция из электрических слоев, которые могут формироваться вблизи поверхности проводящей трубки.

Список литературы

1. Korobeynikov S.M., Ridel A.V., Karpov D.I., Ovsyannikov A.G., Meredova M.B. Mechanism of partial discharges in free helium bubbles in transformer oil // IEEE Trans. Diel. Elec. Insul. 2019. V. 26. No. 5. P. 1605–1611.
2. Korobeynikov S.M., Ridel A.V., Ovsyannikov A.G., Karpov D.I., Lyutikova M.N., Kuznetsova Yu.A., Yassinskiy V.B. Study of partial discharges in liquids // J. Electrostat. 2020. V. 103. P. 103412.
3. Chernozatonskii L.A., Gulyaev Y.V., Kosakovskaya Z.Y., Sinitsyn N.I., Torgashov G.V., Zakharchenko Y.F., Fedorov E.A., Val'chuk V.P. Electron field emission from nanofilament carbon films // Chem. Phys. Lett. 1995. V. 233, No. 1–2. P. 63–68.
4. https://tuball.com/ru/additives/

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 16-19-10229)

УДК 532.64+537.29+537.9

О КОНТАКТНЫХ УГЛАХ ПРИ НАЛИЧИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Куперштох А.Л.

Национальный исследовательский Новосибирский государственный университет

e-mail: skn@hydro.nsc.ru

Ранее в работе [1] было показано, что для некоторых жидких диэлектриков (этанол, гексанол, гептанол, октанол и др.) контактный угол капли, лежащей на твердой поверхности в поле тяжести, несколько увеличивается при увеличении электрического поля E. Обсуждается вопрос о том, что при этом изменяется и поверхностное натяжение жидкости. В работе [2] получены похожие результаты при моделировании нанокапель методом молекулярной динамики. Вместе с тем для ряда других жидких диэлектриков эксперименты показывают уменьшение контактного угла в электрическом поле.

В данной работе впервые смоделирован этот процесс в численных экспериментах в рамках сплошной среды. Для описания течения флюида с границами раздела фаз жидкость-пар использован метод решеточных уравнений Больцмана (LBM) [3,4]. Расчеты проводились на трехмерной кубической решетке с 19 векторами скорости псевдочастиц (D3Q19).

Значения контактного угла зависят от сил взаимодействия жидкости и твердой поверхности. Для этого в метод LBM введены силы, действующие на узлы, прилегающие к твердой поверхности, со стороны пяти соседних узлов твердого тела. Величину адгезии определяет параметр B.

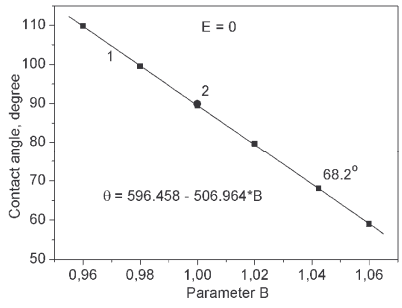


Рис. 1. Зависимость контактного угла от параметра B в отсутствии электрического поля. 1 – численные эксперименты. 2 – теоретическое значение $\theta = 90^o$ при $B = 1$.

На рис. 1 показано, как контактный угол зависит от параметра B в отсутствии электрического поля. После затухания осцилляций, связанных с начальной формой капли, полученные в расчетах профили усреднялись по азимутальному углу. По нескольким точкам усредненного профиля (рис. 2) непосредственно вблизи твердой поверхности вычислялись радиус R и центр аппроксимирующей эти точки окружности (x_0, z_0), а также радиус основания капли r_0. Величина контактного угла вычислялась по формуле $\theta_R = \pi/2 + \arctan(z_0/(r_0 - x_0))$.

При включении электрического поля капля начинает удлиняться вдоль поля, а затем либо приходит к новому стационарному профилю (рис. 2) после затухания осцилляций (~ $0{,}3\cdot10^6$–$3\cdot10^6$ шагов по времени), либо возникает неустойчивость. Поле тяжести соответствовало числу Бонда $\mathrm{Bo} \approx 2$.

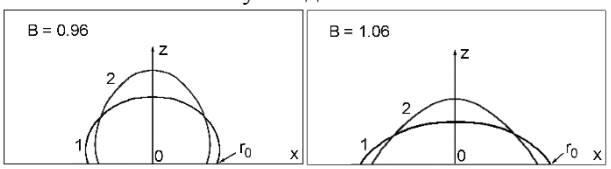


Рис. 2. Профили капель (1) до и (2) после включения электрического поля.

В работе [1] приведены экспериментальные данные для указанных спиртов. Так как данные имели некоторый разброс (≈ 0.4°), то каждая точка усреднялась по девяти экспериментам. На рис. 3 приведена зависимость контактного угла от электрического числа Бонда Bo_E для гексанола [1]. В численных экспериментах выбран флюид, по важнейшим параметрам близкий к гексанолу. Расчетные данные тоже имеют разброс ≈ 0.5° из-за дискретности расчетной сетки при варьировании объема капель. Линейная аппроксимация расчетных точек чуть выше экспериментальной зависимости, так как параметр B =1.0417 был выбран несколько меньший, чем необходимо в соответствии с рис. 1 для гексанола (θ_0 =68,2° при B = 1,0424).

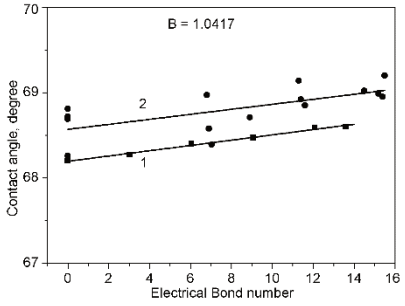


Рис. 3. Зависимость контактного угла от электрического числа Бонда. 1(■) – экспериментальные данные [1] для гексанола. 2(●) – наши численные эксперименты и их линейная аппроксимация.

Список литературы

1. Bateni A., Laughton S., Tavana H., Susnar S.S., Amirfazli A., Neumann A.W. Effect of electric fields on contact angle and surface tension of drops // J. Colloid Interface Sci. 2005. V. 283. P. 215–222.
2. Song F., Ma L., Fan J., Chen Q., Zhang L., Li B.Q., Wetting behaviors of a nano-droplet on a rough solid substrate under perpendicular electric field // Nanomaterials. 2018. V. 8. No. 5. P. 340.
3. Kupershtokh A. L., Medvedev D. A., Karpov D. I. On equations of state in a lattice Boltzmann method // Computers and Mathematics with Applications. 2009. V. 58. No. 5. P. 965–974.
4. Kupershtokh A. L. Criterion of numerical instability of liquid state in LBE simulations // Computers and Mathematics with Applications. 2010. V. 59. No. 7. P. 2236–2245.

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 18-19-00538)

УДК 537.528+537.529+621.315.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ЦЕПОЧКЕ КАВЕРН НА ПЕРЕМЕННОМ НАПРЯЖЕНИИ

Куперштох А.Л., Лазебный Д.Б.

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

e-mail: skn@hydro.nsc.ru

Ранее во многих работах [1,2] моделировались частичные пробои газа в отдельных маленьких кавернах конденсированных диэлектриков. В работах [3,4] была показана возможность возникновения волн в линейных цепочках таких каверн на постоянном и линейно нарастающем напряжении. Были показаны условия перехода от упорядоченного режима к полностью стохастическому.

В данной работе моделируются волны частичных разрядов в цепочках каверн на переменном напряжении. После частичного разряда в одной из каверн электрическое поле в соседних кавернах возрастает. Это приводит к их последующему пробою. В результате в цепочке возникает волна частичных разрядов. Такой режим распространения был назван “эстафетным” [3,4]. На каждом шаге по времени Δt в расчетной области (рис. 1) решается уравнение Пуассона для потенциала электрического поля с учетом переноса зарядов в кавернах. Затем вычисляется максимальная напряженность поля в каждой каверне.

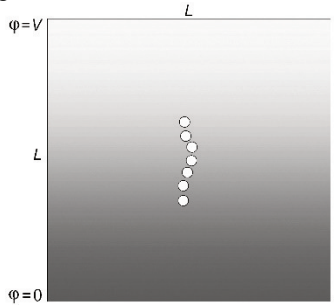


Рис. 1. Расположение каверн в зигзагообразной цепочке.

Известно, что каждый частичный разряд является случайным событием, вероятность которого зависит от превышения величины электрического поля над пороговым значением E_* [1]. Вероятность пробоя за маленький интервал времени определяется функцией

$$r(E) = \alpha(E - E_*) \text{ при } E > E_* .$$

Для воздушных каверн размером d ~ 10 мкм пороговое поле $E_* \approx$ 350 кВ/см [5]. Чтобы смоделировать процесс распространения волны частичных разрядов использовался стохастический критерий возникновения ЧР в каверне MESTL [6]. Разряд в каверне происходит, если случайная величина – статистическое время запаздывания $t_i = -\ln(\xi_i)/r(E_i)$ оказывается меньше Δt. Здесь ξ – случайное число от 0 до 1.

Моделирование проводилось в квадратной расчетной области на сетке 1024×1024. Зазор между электродами L = 0,256 мм, диаметр каверн 10 мкм, α = 4 см/(кВ·мс). Подавалось переменное напряжение $V = V_0 \sin(2\pi f t)$, где V_0 = 10,7 кВ, f = 50 Гц. Показано, что в цепочке каверн возможно возникновение повторных упорядоченных волн ЧР (рис. 2).

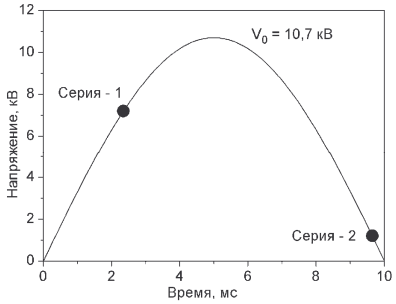


Рис. 2. Две серии частичных разрядов на первом полупериоде напряжения.

На рис. 3 показана первая волна ЧР для цепочки каверн (рис. 1). Приведены значения электрического поля внутри каверн перед пробоем очередной каверны. Перед пробоем первой каверны максимальное поле ($\geq E_*$) в крайних кавернах, откуда и инициируется волна ЧР. Время прохождения волны ЧР по цепочке мало ~ 10 мкс.

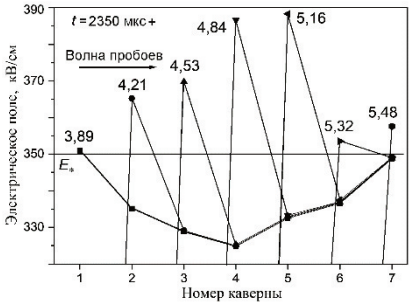


Рис. 3. Значения электрического поля внутри каверн при распространении волны частичных пробоев. Серия 1.

Список литературы

1. Wu K., Suzuoki Y., Dissado L.A. The contribution of discharge area variation to partial discharge patterns in disk-voids // J. Phys. D: Appl. Phys. 2004. V. 37. No. 13. P. 1815–1823.
2. Kupershtokh A.L., Stamatelatos C.P., Agoris D.P. Simulation of partial discharge activity in solid dielectrics under AC voltage // Technical Phys. Lett. 2006. V. 32. No. 8. P. 680–683.
3. Kupershtokh A.L., Karpov D.I. Simulation of waves of partial discharges in a chain of gas inclusions located in condensed dielectrics // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 754. No. 10. P. 102006.
4. Kupershtokh A.L., Karpov D.I. "Relay-race" mechanism of partial discharges in a long chain of cavities for stochastic nature of process // J. Electrostatics. 2018. V. 94. P. 8–13.
5. Peschot A., Poulain C., Bonifaci N., Lesaint O. Electrical breakdown voltage in micro- and submicrometer contact gaps (100 nm – 10 μm) in air and nitrogen // Proc. IEEE Holm Conf. Electrical Contacts. 2015. P. 280–286.
6. Kupershtokh A.L., Charalambakos V., Agoris D., Karpov D.I. Simulation of breakdown in air using cellular automata with streamer to leader transition // J. Phys. D: Appl. Phys. 2001. V. 34. No. 6. P. 936–946.

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 16-19-10229)

УДК 537.84

МЕХАНИЗМЫ ПЕРЕНОСА И СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЯ В ТОНКИХ СДВИГОВЫХ СЛОЯХ И СТРУЯХ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Листратов Я.И.[1,2], Свиридов Е.В.[1,2], Беляев И.А.[1,2], Зиканов О.Ю.[3], Колесников Ю.Б.[4], Краснов Д.С.[4]

[1] Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва
[2] Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва
[3] University of Michigan – Dearborn, Дирборн, США
[4] Technische Universitat Ilmenau, Ильменау, Германия

e-mail: yaroslav.listratov@gmail.com

Электропроводные жидкости, взаимодействующие с магнитным полем (МП), являются неотъемлемым элементом многих промышленных процессов и технических систем, например, жидкометаллических контуров термоядерного реактора, системы для выращивания полупроводниковых кристаллов и др. Обеспечение эффективности, порой даже реализуемости подобных процессов требует фундаментального понимания влияния МП различной ориентации на течения электропроводных жидкостей.

МГД-течения при больших значениях чисел Гартмана и Стюарта обладают сложно предсказуемой и все еще недостаточно изученной динамикой [1, 2]. В большинстве случаев, течение характеризуется неустойчивостями ламинарных решений к квазидвумерным возмущениям. Другая особенность МГД-течений – формирование тонких сдвиговых слоев внутри течения или около стенок, также подверженных неустойчивостям. В работе представлены первые результаты исследования механизмов и свойств поведения основных типов когерентных структур, возникающих в канонических струйных и сдвиговых течениях в условиях воздействия магнитного поля.

На рис. 1 и 2 показаны результаты визуализации прямого численного моделирования (DNS) при числах Re = 1000 и Ha = 100, проведенного с разрешением сетки 1024x128x128 узлов в *X*-, *Y*- и *Z*-направлении соответственно, для некоторых из исследуемых конфигураций течения – затопленные круглая (рис. 1) и плоская (рис. 2) струи в квадратном канале в поперечном МП (основная компонента МП действует в *Y*-направлении). Мгновенные состояния течения после расчета 10 конвективных единиц эволюции (*a* и *b*) характеризуются изоповерхностями осевой компоненты скорости U_x (фиолетовый цвет, 1.3 от средне-расходной) и вертикальной компоненты скорости U_z (коричневый и голубой, ±0.2 от средне-расходной), а также трансформацией профилей осевой скорости вниз по потоку (*c* и *d*).

Для случая круглой струи (рис. 1) видно, что ориентация МП может оказывать существенный эффект, а именно – стабилизация течения в случае однородного МП (*a* и *c*) и развитие неустойчивости типа Кельвин-Гельмгольца в случае неоднородного МП (*b* и *d*). Также, результаты говорят о том, что измерение интегральных характеристик течения, таких как профили осевой скорости, могут не дать полной картины о состоянии и развитии неустойчивых явлений в потоке. В случае плоской струи (рис. 2) в неоднородном МП при изотермическом течении (*a* и *c*) и опускном течении с подогревом нижней стенки канала (*b* и *d*) при $Gr = 2.0 \cdot 10^6$, $Pr = 0.021$, видно, что даже небольшой тепловой поток может оказать существенный эффект, а именно – возникновение нестационарного течения, развитие неустойчивости типа Кельвин-Гельмгольца, а также образование крупномасштабных вторичных структур и обратных течений, способных создать локальные зоны с высокой температурой.

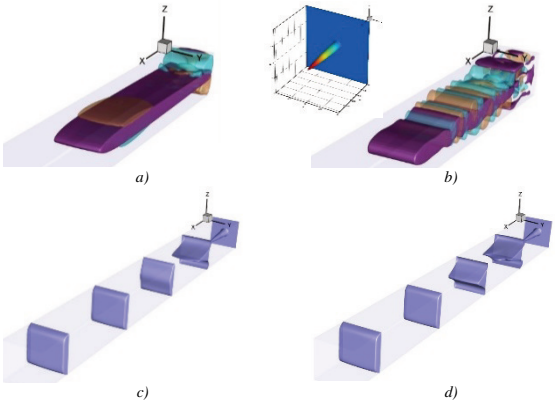


Рис. 1. Течение затопленной круглой струи под воздействием поперечного магнитного поля при Re = 1000 и Ha = 100 : a) и c): однородное МП; b) и d): неоднородное МП на входе.

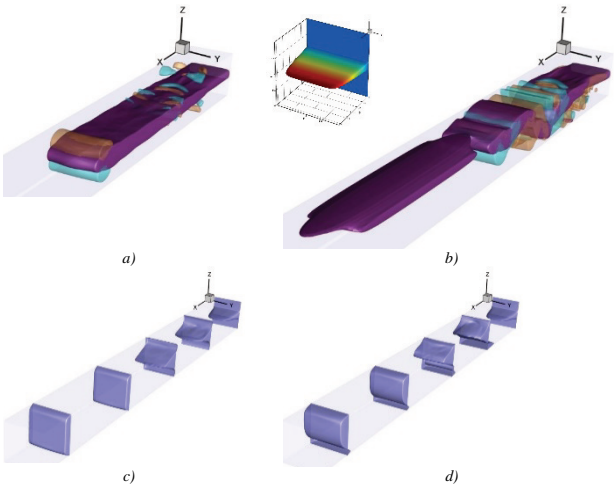


Рис. 2. Течение затопленной плоской струи под воздействием поперечного магнитного поля Re = 1000 и Ha = 100: a) и c): изотермическое течение; b) и d): опускное течение с подогревом нижней стенки: $Gr = 2.0 \cdot 10^6$, $Pr = 0.021$.

Список литературы

1. Branover H. Magnetohydrodynamic flows in ducts // Wiley, 1978.
2. Davidson P. A. An Introduction to Magnetohydrodynamics //. 2nd Ed., Cambridge University Press, Cambridge, 2016.

Работа поддержана РНФ (грант № 20-69-46067)

УДК 41.64:532.135

ВСПЛЕСКИ РАСТВОРОВ ПОЛИМЕРОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Рожков А.Н.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

e-mail: rozhkov@ipmnet.ru

Экспериментально исследован распад капель жидкости при столкновении с твердыми препятствиями в отсутствии и в присутствии электрического поля. В качестве исследуемых жидкостей использовались вода и растворы полиэтиленоксида (ПЭО), а также полиакриламида (ПАА). Мы использовали нестандартную гидродинамическую конфигурацию, когда сферическая капля ударяла по небольшому дискообразному твердому препятствию – мишени. При ударе капли воды образовалась ламелла, т.е. круглая свободная пленка с тороидальной краевой струёй, которая сначала увеличивалась в диаметре, а затем схлопывалась с выбросом вторичных капель с краевой струи (рис. 1). Использование дискообразной мишени позволило осуществить столкновение жидкости с твердым телом в отсутствии вязкого трения между жидкостью и твёрдым препятствием. Полимерные добавки не влияли на рост и скорость расширения и схлопывания ламеллы. Однако они изменили процесс разрушения всплеска: между вторичными каплями и краевой струёй ламеллы образовались утончающиеся нити, предотвращающие отрыв вторичных капель и соответствующее разбрызгивание. Чтобы наложить электрическое поле на ламеллу, высокое положительное напряжение прикладывалось непосредственно к металическому дискообразному припятствию (мишени). Другой электрод заземления представлял собой цилиндрический медный лист, расположенный осесимметрично с дискообразной мишенью, он окружал мишень. В результате вокруг мишени образовалось радиальное электрическое поле, и в то же время мишень положительно заряжала жидкость ударной капли. Перепад напряжения изменялся с нуля до 10 кВ. Эксперименты показали, что приложенное напряжение не влияет на скорость роста и схлопывания ламеллы. Также не наблюдалось изменений в распаде очень разбавленных (0.001‰) и очень концентрированных (10‰) растворов полимеров. С другой стороны, новые особенности распада ламеллы могут быть вызваны высоким напряжением в промежуточном диапазоне концентраций. Во время разрушения капель ПЭО концентраций 0.01, 0.1 и 1‰, а также капель ПАА концентрацией 0.01‰ дополнительные вторичные нити инжектировались из вторичных капель под действием электрического поля. Эти вторичные нити направлены наружу от центра ламеллы и выглядят тоньше и длиннее, чем первичные полимерные нити. В результате образовывались звездообразные жидкие структуры. Колесоподобные ламеллы с растворами ПАА 0.1 и 1‰ лишь незначительно возмущались действием сильного электрического поля.

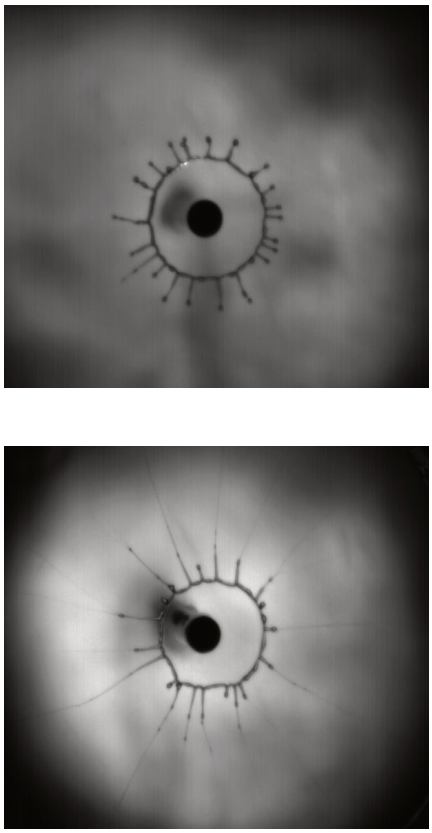


Рис. 1. Всплеск раствора ПЭО концентрации 0.1‰ спустя 4 мс после начала столкновения в отсутствии электрического поля (верхний кадр) и при перепаде напряжений 6 кВ (нижний кадр). Показан вид сверху. Черный круг в центре кадра – дискообразное препятствие (мишень) диаметром 4 мм.

Список литературы

1. Rozhkov A., Prunet-Foch B., Vignes-Adler M. Star-like breakup of polymeric drops in electrical field // Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. 2015. V. 226. P. 46–59.
2. Bazilevsky A. V., Rozhkov A. N. Letter: Dome-shaped splashes generated by the impact of a small disk on a sessile water drop // Physics of fluids. 2018. V. 30. P. 101702-1–101702-4.

Работа выполнена в рамках государственного задания № АААА-А20-120011690131-7

УДК 533.9.082

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРЫ ИНДУКТИВНО-СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМЫ ВОДЯНЫХ ПАРОВ С ПОМОЩЬЮ ЗАКОНА ФУРЬЕ

Савенко Р.А., Медведев Р.Н.

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

e-mail: savenko.roma@yandex.ru

Индуктивно-связанная плазма водяных паров имеет преимущества для использования в некоторых областях промышленности такие, как дешевизна, доступность, наличие атмосферного кислорода и радикала OH. Для целей проектирования установок необходимо знать, какая мощность генератора будет достаточна для разогрева плазмы до заданной температуры.

В данной работе сделана экспериментальная оценка зависимости температуры водной индуктивно-связанной плазмы от вводимой мощности.

Использовалось следующее оборудование: высокочастотный генератор с частотой 40 МГц и максимальной мощностью 4 кВт, блок согласования с управляемыми переменными ёмкостями, медный индуктор с 4 витками, П-образная кварцевая трубка с внешним диаметром разрядного отсека 9,5 мм, колба с водой, форвакуумный насос и вакуумметр. Давления плазмы составляли 1-10 мбар.

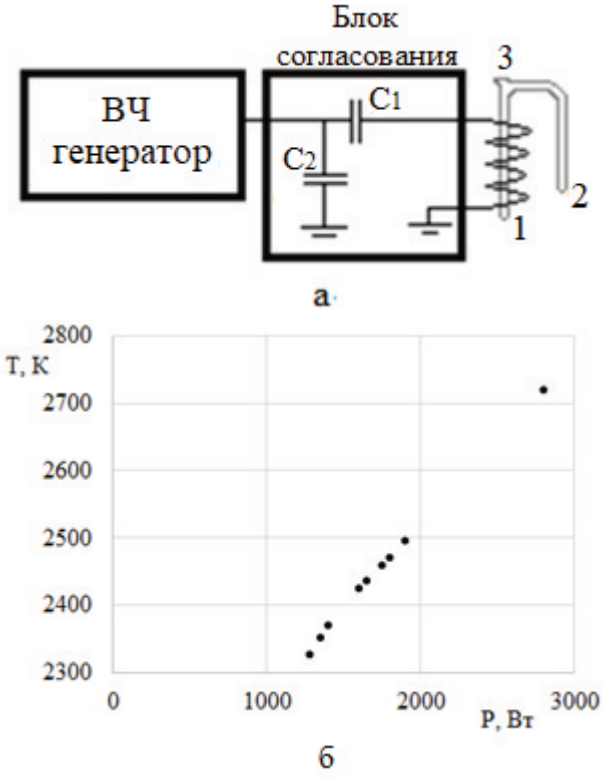


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (а). Зависимость температуры плазмы, оценённой методом Фурье, от вводимой в плазму мощности (б).

К правому краю кварцевой трубки (обозначено цифрой 2 на Рис. а.) был подсоединён форвакуумный насос через вакуумметр Testo 512 с диапазоном измерений 0,1–10 мбар, к левому краю трубки (обозначено цифрой 1 на Рис. а.) – ёмкость с водой. К верхнему торцу трубки (обозначено цифрой 3 на Рис. а) подводился световод спектрометра Колибри-2 (диапазон 190–1120 нм)

Для оценки температуры использовались данные по вводимой в индуктивно-связанную плазму мощности и закон Фурье. Считая, что вся вводимая мощность поглощается индуктивно-связанной плазмой и выделяется в виде джоулева тепла, и используя справочные данные по теплопроводности водяных паров [1] и кварцевого стекла, можно оценить температуру плазмы. Для оценок плазма представлялась в виде тора радиуса 3,5 мм, сечением которого являлся эллипс, полуоси которого равны 0,5 мм и 11 мм. Предполагалось, что вся выделяемая в плазме мощность уходит через боковые стенки в окружающее пространство из-за теплопроводности.

Также температура измерялась при помощи метода Орнштейна [2] в предположении локального термодинамического равновесия в получаемой плазме. Для этого были использованы полученные в экспериментах спектры паров воды, содержавшие Бальмеровскую серию водорода. Температура вычислялась по формуле:

$$T = \frac{E_p - E_m}{k\left[\ln\frac{J_{mn}}{J_{pq}} + \ln\frac{A_{pq}g_p\lambda_{mn}}{A_{mn}g_m\lambda_{pq}}\right]}$$

где g_p и g_m – статистические веса возбуждённых уровней p и n соответственно, A_{pq} и A_{mn} – коэффициенты Эйнштейна для спонтанного излучения, J_{mn} и J_{pq} – локальные интенсивности излучения линий, λ_{mn} и λ_{pq}– длины волн, E_m и E_p – значение энергии атома уровней m и p соответственно, k – постоянная Больцмана. Для расчёта использовалась серия Бальмера атома водорода.

В результате был построен график оценённой температуры плазмы от вводимой мощности (Рис. б). Методом Орнштейна было выяснено, что плазма не находится в локальном термодинамическом равновесии, но порядок температур плазмы составляет 0,2-0,3 эВ (около 2-3 кК) при мощности 1,3 – 2,8 кВт, что согласуется с результатами, полученными с помощью закона Фурье.

Список литературы

1. Варгафник Н. Б. Справочник по теплофизическим свойства газов и жидкостей// М.: издательство «наука». 1972. 720 с.
2. Колесников В.Н. Спектроскопическая диагностика плазмы// М.: МИФИ. 2007. 220 с.

Работа поддержана РФФИ (грант № 16-38-60039)

УДК 537.868.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ВОДОНЕФТЯНЫЕ ЭМУЛЬСИИ

Султангужин Р.Ф., Зиннатуллин Р.Р., Ковалева Л. А.

Башкирский государственный университет, Уфа

e-mail: rasulz@yandex.ru

Одной из важнейших задач при переработке нефти является отделение нефти от воды. Эффективность способа деэмульсации зависит от свойства эмульсий и факторов, влияющих на их устойчивость. Особенно актуальными являются поиски более универсальных и эффективных способов деэмугирования нефтепродуктов, так как на каждом месторождении свои методы добычи и физико-химические свойства. Также, существует проблема утилизации нефтешламов.

Одним из перспективных, с точки зрения экологической безопасности, и эффективных по действию методов обезвоживания эмульсий является использование электромагнитных полей. Данные методы прошли лабораторные испытания и оказались эффективными для отдельно взятых месторождений [1]. Подобные исследования проводились зарубежными учеными, например T.Y. Chen [2] и Lars E. Lundgaard [3], главными отличиями нашей работы является использование более высоких частот (от 10 кГц до 1 МГц) и использование оригинальной экспериментальной установки.

Остаются непонятными механизмы воздействия полей различной конфигурации и частоты на эмульсии с различными по составу бронирующими оболочками. Для этого необходимо визуализировать влияние электромагнитного поля на микроструктуры эмульсий, чтобы выявить закономерности поведения эмульсий и механизмы взаимодействия в электромагнитных полях с различными параметрами.

Для исследования воздействия электромагнитного поля на эмульсионные капли использовался лабораторный стенд (рис.1).

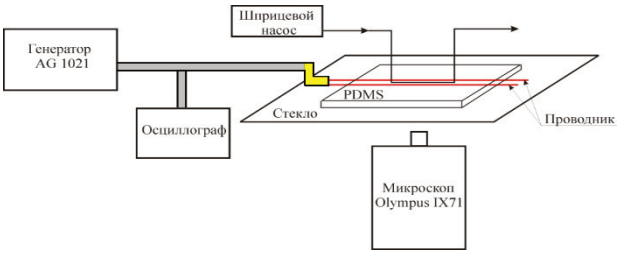


Рис. 1. Принципиальная схема лабораторного стенда для электромагнитного воздействия на водонефтяные эмульсии в динамическом режиме.

Результаты исследований воздействия электромагнитного поля на исследуемые образцы водонефтяных эмульсий показали, что под действием НЧ и ВЧ электромагнитного поля образуются агрегаты капель в виде цепочек, вытянутых преимущественно вдоль направления силовых линий электрического поля. Параметры воздействия (частота излучения, мощность излучения, время воздействия) для каждого образца эмульсии подбирались индивидуально в зависимости от их диэлектрических свойств. На рис. 2 представлены кадры до и после воздействия ВЧ электромагнитным полем на один из исследуемых образцов водонефтяной эмульсии.

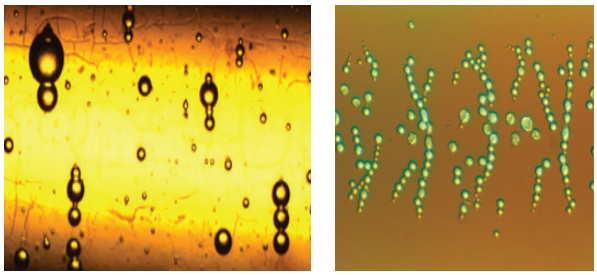


Рис. 2. Фотографии микроструктуры образца водонефтяной эмульсии (левая – модельная, правая – реальная) после воздействия ВЧ ЭМ полем (f=0,5МГц; N=45Вт; t=10сек).

Образование коагуляционных цепочек обусловлено поляризацией двойного электрического слоя (тонкий слой, сформированный двумя пространственно разделенными слоями электрических зарядов разного знака) и возникновением в результате этого индуцированного дипольного момента капли. Формирование индуцированного дипольного момента в водонефтяных эмульсиях типа “вода в нефти” осуществляется следующим образом. После приложения поля свободные положительные заряды в дисперсных частицах воды движутся по полю, отрицательные – в противоположном направлении и, естественно, задерживаются у поверхности раздела фаз. Индуцированный дипольный момент обусловливает диполь-дипольное притяжение капель воды, вследствие чего образуются коагуляционные цепочки. Сближение капель воды под действием диполь-дипольного притяжения происходит до тех пор, пока на некотором расстоянии силы притяжения не будут уравновешены силами отталкивания двойного электрического слоя капли. При сильных напряженностях электромагнитного поля преодолевается энергетический барьер сил отталкивания двойных электрических слоев и происходит слияние капель воды.

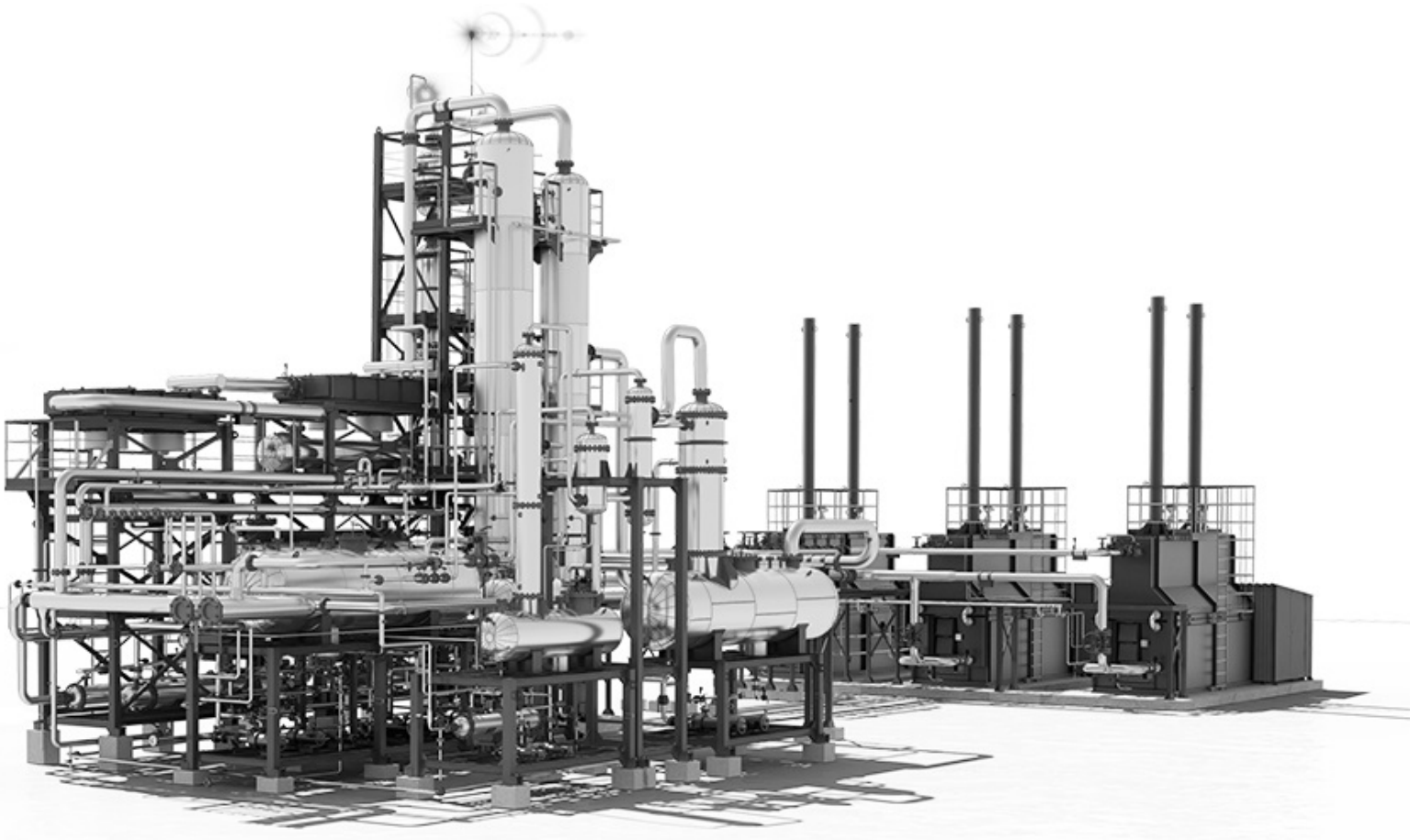
Список литературы

1. Kovaleva L. A., Minnigalimov R. Z., Zinnatullin R. R. Destruction of water-in-oil emulsions in radio-frequency and microwave electromagnetic fields // Energy & Fuels. 2011. Т. 25. №. 8. P. 3731.
2. Chen T. Y. et al. Dewatering of crude oil emulsions 4. Emulsion resolution by the application of an electric field // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 1994. V83(3). P. 273–1284.
3. Lundgaard L. E. et al. Electrocoalescence of water drop pairs in oil // Proceedings of 2002 IEEE 14th International Conference on Dielectric Liquids. ICDL. 2002. P. 215–219.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-11-00298)



СЕКЦИЯ 9
Теплообмен и гидродинамика в технологических процессах и защита окружающей среды



УДК 662.636

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ВЫХОД ПРОДУКТОВ ПИРОЛИТИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ МУКОМОЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Астафьев А.В., Табакаев Р.Б.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
e-mail: ava31@tpu.ru

Вовлечение в топливно-энергетический баланс страны различных отходов возобновляемой растительной биомассы поспособствует снижению негативного влияния энергетической отрасли на окружающую среду как за счет снижения доли использования ископаемого топлива, так и за счет утилизации отходов местного сырья. Сибирский Федеральный Округ является лидером по количеству различных ресурсов растительной биомассы, в том числе и отходов сельскохозяйственной промышленности, которые могут быть полезно использованы в энергетических целях.

Эффективным методом получения из растительной биомассы твердых, жидких и газообразных продуктов, пригодных для энергетического использования, является пиролиз. Целью данной работы является оценка выхода продуктов пиролиза из отходов мукомольного производства одного из крупных предприятий Сибири при различной температуре процесса.

Выход углеродистого остатка оценивался на лабораторной установке (рис. 1) согласно методике, представленной в [1].

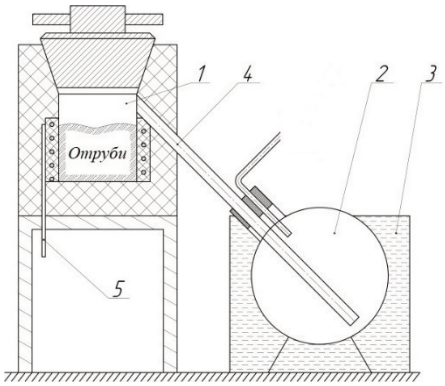


Рис. 1. Установка для определения выхода продуктов пиролиза: 1 – реактор; 2 – колба; 3 – охлаждающий сосуд; 4 – отводящая трубка; 5 – термопара.

Для определения выхода пиролизного конденсата установка дополнительно оснащалась мерным цилиндром. В процессе нагрева записывался уровень пиролизного конденсата с промежутком в 50°С от начала выделения до окончания процесса (500°С). После окончания эксперимента пиролизный конденсат взвешивался и определялась его плотность для расчета массового выхода. Выход газа определялся путем вычитания из массы исходного сырья суммы масс углеродистого остатка и пиролизного конденсата. Все расчеты велись на сухую массу сырья.

Плотность пиролизного конденсата по результатам эксперимента составила 1140 кг/м^3, что согласуется с литературными данными [2]. На рис. 2 представлен выход углеродистого остатка из отходов мукомольного производства при различных температурах процесса. Из зависимости следует, что основная потеря массы сырья приходится на температурный интервал 200-300°С, согласно литературным данным при этих температурах разлагается гемицеллюлоза, начинается разложение лигнина и целлюлозы [3]. В табл. 1 приведен выход жидких и газообразных продуктов пиролитической переработки при различных температурах. Из полученных результатов видно, что максимального выделения газа можно добиться при температуре процесса, равной 300°С. Основная часть выхода пиролизного конденсата приходится на температурный интервал 300-400°С, что связано с разложением в этом интервале основных компонентов сырья – лигнина и целлюлозы.

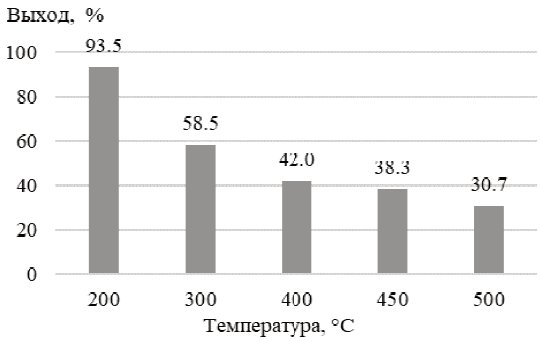


Рис. 2. Зависимость выхода углеродистого остатка от температуры пиролиза.

Табл. 1. Материальный баланс пиролиза

Температура процесса,°С	Выход продуктов, %	
	Пиролизный конденсат	Газ
200	0,0	6,5
300	0,1	41,4
400	36,1	21,9
450	44,9	16,8
500	50,0	19,3

Список литературы

1. Tabakaev R.B. et al. Thermal enrichment of different types of biomass by low-temperature pyrolysis // Fuel. 2019. T. 245. P. 29–38.
2. Забелкин С.А., Грачев А.Н., Нурияхметов Р.А., Гильфанов М.Ф., Варфоломеев М.А. Совместная термическая переработка бионефти с тяжёлой нефтью // Вестник технологического университета. 2017. Т. 20. № 12. С. 50–52.
3. Wang S., Dai G., Yang H., Luo Z. Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism: A state of the art review // Progress in Energy and Combustion Science. 2017. V. 62. P. 33–86.

Работа поддержана РНФ
грант № 19-79-00085 (2.2086.РНФ.2019)

УДК 541.13+11

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОПЛАЗМЕННОЙ ФАЗЫ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ РАДИОАКТИВНОГО ГРАФИТА В ПЛАЗМЕННОЙ ПЕЧИ

Барбин Н.М.[1], Кобелев А.М.[1], Терентьев Д.И.[1], Алексеев С.Г.[2]

[1] Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России, Екатеринбург
[2] Уральский научно-исследовательский институт ВДПО, Екатеринбург

e-mail: nmbarbin@mail.ru

Одним из видов твердых радиоактивных отходов, образуемых после вывода из эксплуатации АЭС, является радиоактивный графит, в котором накапливаются различные радионуклиды. Общее количество облученного графита в странах мира составляет около 230 – 250 тыс. тонн, существующие способы его переработки имеют ряд принципиальных недостатков. Принимая во внимание, что, начиная с 2018 по 2023 гг. реализуется программа по выведению из эксплуатации уран-графитовых энергоблоков первого поколения, а с 2025 года постепенное выведение энергоблоков АЭС второго поколения, проблема переработки радиоактивного графита встает все острее [1].

В настоящее время наиболее перспективными способами обращения с отработавшими графитовыми материалами являются сжигание [2].

Существуют разные способы сжигания графита: традиционное; в кипящем слое; с помощью плазмохимического реактора, газификация графита с помощью перегретого водяного пара (пиролиз), в расплаве карбонатов щелочных металлов в присутствии окислителя, в расплаве одного из карбонатов щелочных металлов или их смесей в присутствии оксида свинца [2].

В работах [3-7] рассматривается плазменная переработка радиоактивных отходов.

При использовании в качестве плазмообразующего газа водяных паров образуются горючие газы [8]. Их состав может быть определен методом термодинамического моделирования системы радиоактивный графит – пары воды с применением программного комплекса TERRA [8]. Программа предназначена для определения состава фаз, термодинамических и транспортных свойств произвольных систем с химическими и фазовыми превращениями. В расчетах равновесного состава фаз и параметров равновесия использовали справочную базу данных свойств индивидуальных веществ (ИВТАНТЕРМО, HSC и др.) [8].

В интервале температур от 1173 до 1473 К уменьшается парциальное давление CO_2 до ~0,069 атм., H_2 до ~0,402 атм., CH_4 до нуля и увеличивается парциальное давление CO до ~0,263 атм., паров H_2O до ~0,263 атм., H до ~$8{,}04\cdot10^{-6}$ атм. Парциальное давление HCl в диапазоне температур от 1173 до 1473 К составляет ~2,13 10^{-6} атм. и не изменяется. В диапазоне температур от 1473 до 1973 К уменьшается парциальное давление CO_2 до ~0,047 атм., H_2 до ~0,380 атм. и увеличивается парциальное давление CO до ~0,285 атм., паров H_2O до ~0,285 атм., H до ~$8{,}33\cdot10^{-4}$ атм., OH до ~$5{,}89\cdot10^{-5}$ атм. Парциальное давление HCl в интервале температур от 1473 до 1973 К составляет ~$2{,}13\cdot10^{-6}$ атм. и не изменяется. В области температур от 1973 до 2173 К уменьшается парциальное давление CO_2 до ~0,042 атм., H_2 до ~0,374 атм., HCl до~$2{,}12\cdot10^{-6}$ атм. и увеличивается парциальное давление CO до ~0,289 атм., паров H_2O до ~0,289 атм., H до ~$2{,}95\cdot10^{-3}$ атм., OH до ~$3{,}04\cdot10^{-4}$ атм., UO_3 до ~$1{,}45\cdot10^{-6}$ атм. При температуре от 2173 до 2773 К уменьшается парциальное давление паров H_2O до ~0,28 атм., H_2 до ~0,342 атм., CO_2 до ~0,034 атм., UO_3 до ~$1{,}12\cdot10^{-6}$ атм., HCl до ~$1{,}91\cdot10^{-6}$ атм. и увеличивается парциальное давление CO до ~0,29 атм., H до ~0,044 атм., OH до ~$9{,}6\cdot10^{-3}$ атм., O до ~$7{,}7\cdot10^{-4}$ атм., O_2 до ~$2{,}51\cdot10^{-4}$ атм. В диапазоне температур от 2773 до 2973 К уменьшается парциальное давление паров H_2O до ~0,257 атм., H_2 до ~0,32 атм., CO до 0,283 атм., CO_2 до ~0,03 атм., UO_3 до ~$1{,}01\cdot10^{-6}$ атм., HCl до ~$1{,}72\cdot10^{-6}$ атм. и увеличивается парциальное давление H до ~0,082 атм., OH до ~0,021 атм., O до ~$3{,}35\cdot10^{-3}$ атм., O_2 до ~0,001 атм., CHO до ~$1{,}83\cdot10^{-6}$ атм. В интервале температур от 2973 до 3273 К уменьшается парциальное давление паров H_2O до ~0,187 атм., H_2 до ~0,27 атм., CO до 0,26 атм., CO_2 до ~0,02 атм., UO_3 до ~$7{,}7\cdot10^{-7}$ атм., HCl до ~$1{,}2\cdot10^{-6}$ атм. и увеличивается парциальное давление H до ~0,17 атм., OH до ~0,04 атм., O до ~0,01 атм., O_2 до ~0,004 атм., CHO до ~$2{,}7\cdot10^{-6}$ атм., HO_2 до ~$6\cdot10^{-6}$ атм.

Список литературы

1. Скачек М.А. Радиоактивные компоненты АЭС: обращение, переработка, локализация: учебное пособие для вузов // М.А. Скачек. М.: Издательский дом МЭИ. 2014. 552 с.
2. Цыганов А.А., В.И. Хвостов, Е.А. Комаров и др. Проблемы утилизации реакторного графита остановленных промышленных уран-графитовых реакторов // Известия ТПУ. 2007. Т. 310. №2. С. 94–98.
3. А. Г. Витушко, А. А. Кудринский, С. В. Анпилов и др. Перспективы плазменной переработки радиоактивного графита в шахтной печи Нововоронежской АЭС // ТПТ. 2017. Т. 9. № 3. С. 131–136.
4. Бобраков А.Н., Кудринский А.А., Переславцев А.В. и др. Возможности и перспективы термодинамического моделирования процессов плазменной переработки твердых органических отходов в шахтной печи // ЭКиП. 2013. № 9. С. 46–51.
5. Бобраков А.Н., Кудринский А.А., Переславцев А.В. и др. Плазменная переработка радиоактивных цезийсодержащих отходов в шахтной печи // ЭКиП. 2014. № 4. С. 4–8.
6. Бобраков А.Н., Кудринский А.А., Переславцев А.В. и др. Развитие плазменных методов переработки твердых радиоактивных отходов // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). 2012. Т. LVI. №5–6. С. 65–75.
7. Бобраков А.Н., Кудринский А.А., Кулыгин В.М. и др. Российский опыт переработки твердых радиоактивных отходов: достижения и перспективы // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д. И. Менделеева). 2012. Т. LVI. №5–6. С. 76–86.
8. Барбин Н. М., Кобелев А. М., Терентьев Д. И., Алексеев С.Г. Термодинамическое моделирование термических процессов с участием радионуклидов хлора, кальция, бериллия, никеля, цезия при нагреве радиоактивного графита в парах воды // Радиохимия. 2019. Т. 61. № 2. С. 142–147.

УДК 621.565

РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ РЛС

Бесчастных В.Н.[1], Борисов Ю.А.[2,3], Косой А.С.[1,2], Низовский Л.В.[2]

[1] ПАО «Алмаз» им. акад. А.А. Расплетина, Москва
[2] Объединенный институт высоких температур РАН, Москва
[3] Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва

e-mail: boricovyu@gmail.com

Известно, что антенны современных радиолокационных устройств (РЛС) нуждаются в эффективном охлаждении [1], которое осуществляется с помощью принудительной циркуляции хладоносителя – незамерзающей жидкости (антифриз, тосол и некоторые другие). Тепло, отведенное от охлаждаемых элементов антенны, как и тепло, выделяемое другими элементами системы, должно сбрасываться в окружающую среду, чаще воздух. При температуре окружающего воздуха менее 10–15^{o}C отвод тепла в атмосферу осуществляется в теплообменниках «жидкость-газ», обдуваемых воздухом с помощью вентиляторов. При температуре окружающей среды выше 10–15^{o}C для охлаждения прокачиваемой через антенну жидкости-хладоносителя приходится использовать холодильную машину, как правило, компрессорного типа. Такая машина (подобные машины часто называют чиллерами) имеет замкнутый контур с низкотемпературно кипящей жидкостью – как правило смесь углеводородов, называемых фреоны или хладоны (хладагент) [2].

С целью уменьшения массогабаритной характеристики холодильной установки учеными Объединенного института высоких температур РАН (ОИВТ РАН) совместно со специалистами ПАО «Алмаз» была предложена новая гидравлическая схема установки, содержащая первый и второй контур циркуляции охлаждающей жидкости – хладоносителя, а также контур холодильной машины.

Существенного облегчения модернизированной холодильной установки и уменьшения ее габаритов удалось достичь благодаря применению в конденсаторе нового теплообменника типа «жидкость – жидкость». Также снижение веса и уменьшение габаритов холодильной установки обеспечилось использованием для сброса тепла в окружающую среду холодильного цикла и контура «прямого охлаждения» (по первому режиму работы зимой) одного и того же теплообменника низкого давления «жидкость-газ». Принципиальная схема холодильной установки, представленная на рисунке 1, состоит из: насоса первого контура циркуляции охлаждающей жидкости 1; испарителя 2; потребителя (антенны РЛС) 3; жидкостно-воздушного теплообменника 4; клапанов 5 и 6; компрессора холодильной машины 7; насоса второго контура циркуляции охлаждающей жидкости 8; конденсатора 9; дросселя холодильной машины 10.

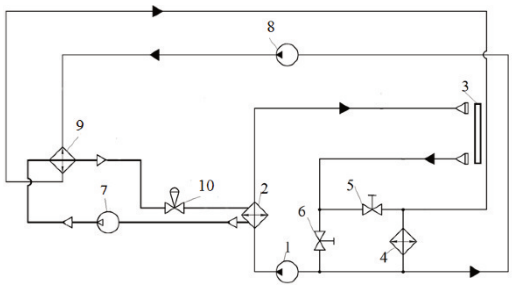


Рис. 1. Принципиальная схема холодильной установки.

Для проверки работоспособности холодильной установки и подтверждения заявленных характеристик на базе предложенной схемы был спроектирован и изготовлен экспериментальный стенд. В работе были рассмотрены результаты испытаний холодильной установки при различных режимах работы.

Успешные испытания холодильной установки экспериментально подтвердили работоспособность схемы охлаждения с единым сбросным теплообменником «жидкость-воздух» низкого давления и гибкой автоматизированной системой регулирования.

Список литературы

1. Barton D.K. Recent Developments in Russian Radar Systems // Proc. of IEEE Int. Radar Conf. Washington, D.C., USA. 1995. P. 340–346.
2. A.Baskaran, P.Koshy Mathews A Performance comparison of vapour compression refrigeration system using various alternative refrigerants // International Journal of Scientific & Engineering Research, V. 3. Ins. 10. P. 1–7.

УДК 621.352.6

МЕТАЛЛОГИДРИДНЫЕ ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Блинов Д.В., Дуников Д.О., Казаков А.Н.

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

e-mail: d.v.blinov.jihtras@yandex.ru

Водородные энергоустановки на основе топливных элементов (ТЭ) отличаются высоким КПД и экологической чистотой. Основным типом низкотемпературных ТЭ являются твердополимерные (ТПТЭ), обычно работающие при температурах до 80°С и разрабатываемые в основном для транспорта. Чтобы достичь требуемой активности и снизить потери в ТПТЭ, в них используют использовать катализаторы из благородных металлов. Хотя содержание платины удалось снизить до 0.172 г/кВт [1], продолжаются исследования по поиску альтернативных катализаторов, не содержащих драгоценные металлы.

Обратимые гидриды интерметаллических соединений в интеграции с ТЭ рассматриваются в качестве перспективных систем аккумулирования энергии [2]. Аккумуляторные батареи на основе металлогидридов (NiMH) широко используются на практике, также возможно и создание щелочных топливных элементов на их основе, где металлогидрид объединяет функции водородоаккумулирующего материала и анодного катализатора [3, 4].

Металлогидридные топливные элементы (МГТЭ) могут работать при температурах, близких к нормальным условиям, еще одно их преимущество заключается в возможности зарядки двумя способами, как электрохимически, так и подачей водорода под давлением. Хранение топлива внутри электрода топливного элемента, присущее МГТЭ, может ускорить отклик устройства, дает возможность перезаряжать его без останова и обеспечить больший срок службы по сравнению с ТПТЭ. Недостаток МГТЭ, как и любых бесплатиновых топливных элементов, связан с низкими плотностями тока. Экспериментально полученные для МГТЭ данные по напряжению составили 0.65 В при плотности тока 20 мА/см2 с использованием воздуха и 0.78 В для кислорода [5].

Для стационарных применений массогабаритные характеристики не являются определяющими, и МГТЭ в качестве топливных элементов со встроенной возможностью аккумулирования энергии могут найти свою нишу. Более того, МГТЭ могут работать обратимо в качестве электролизеров с аккумулированием водорода в интерметаллиде, то есть действовать в виде унифицированного обратимого топливного элемента.

В Лаборатории водородных энергетических технологий ОИВТ РАН ведутся работы по созданию металлогидридного топливного элемента с бесплатиновыми электродами, предназначенного для использования в системах аккумулирования энергии ВИЭ в распределенной энергетике.

Разработана концепция ячейки МГТЭ (рис. 1) и исследованы процессы тепломассопереноса в элементах ячейки. Основной лимитирующей стадией процесса заряда-разряда металлогидридного электрода является диффузия водорода из жидкой среды электролита в твердую фазу. Образование гидроксидных пленок и/или медленное растворение компонентов металлогидридного материала на границе фаз может вызывать дополнительные кинетические ограничения, а также уменьшение концентрации каталитически активного Ni на поверхности электрода. Для повышения диффузионных свойств необходимо использование модифицированных металлогидридных материалов, например, с углеродными и графеноподобными наноматериалами.

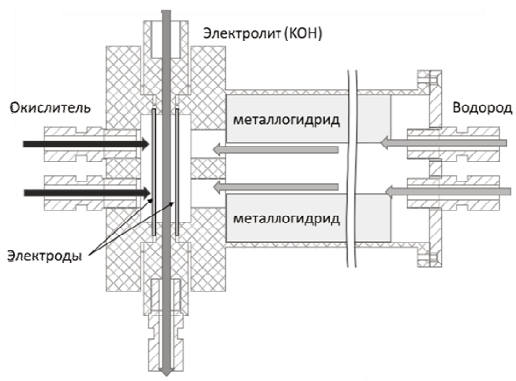


Рис. 1. Ячейка металлогидридного топливного элемента.

Выполнены тестовые эксперименты с использованием металлогидридного электрода на основе сплава типа AB_5 ($La_{0.8}Ce_{0.2}Ni_4Co_{0.5}Mn_{0.3}Al_{0.2}$). При малых плотностях тока (до 100 мА/г) емкость электрода составила около 300 мАч/г, при половинной электрохимической емкости электрода (150 мАч/г) напряжение при плотности тока 200 мА/г составило 0.65 В. Таким образом, для данного сплава плотность тока на ячейке составляет 25 мА/см^2, а мощность ячейки ТЭ может достичь 130 мВт/г сплава.

Список литературы

1. Wang Y., Ruiz Diaz D.F., Chen K.S., Wang Z., Adroher X.C. Materials, technological status, and fundamentals of PEM fuel cells – A review // Materials Today. 2020. V. 32. P. 178–203.
2. Hirscher M., Yartys V.A., Baricco M., et al. Materials for hydrogen-based energy storage – past, recent progress and future outlook // Journal of Alloys and Compounds. 2020. V. 827. Art. 153548.
3. Lemmon J.P. Energy: Reimagine fuel cells // Nature. 2015. V. 525. No 7570. P. 447–449.
4. Lototskyy M.V., Tolj I., Pickering L., Sita C., Barbir F., Yartys V. The use of metal hydrides in fuel cell applications // Progress in Natural Science: Materials International. 2017. V. 27. No. 1. P. 3–20.
5. Chartouni D., Kuriyama N., Kiyobayashi T., Chen J. Metal hydride fuel cell with intrinsic capacity // International Journal of Hydrogen Energy. 2002. V. 27. No. 9. P. 945–952.

Работа поддержана РНФ (проект № 17-79-20413)

УДК 621.45.022.2

СПОСОБ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО РАСПЫЛА ВСПЕНЕННЫХ ЖИДКИХ ТОПЛИВ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КАМЕР СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Васильев А.Ю., Челебян О.Г., Свириденков А.А., Домрина Е.С., Логинова А.А., Тарасенко А.Н.

ФГУП «ЦИАМ им. П.И.Баранова», Москва

e-mail: tarasenkoan98@yandex.ru

Процесс распыливания и испарения жидкого топлива имеет принципиальное значение для эффективной и надежной работы камеры сгорания (КС) в современных газотурбинных двигателях (ГТД) и непосредственно влияет на уровень образования вредных веществ в выхлопных газах. Изменение климата Земли и ужесточение норм ИКАО [1], требуют вести поиск новых высокоэффективных способов распыливания, позволяющих получать мелкодисперсную смесь, равномерно засеянную частицами жидкого топлива с воздухом во фронтовой части КС.

Помочь в поиске и выборе способа распыливания могут классификации и описания работы устройств, приведенные, например, в [2].

Одним из высокоэффективных способов дробления жидкого топлива на капли является метод барботирования, состоящий в подводе воздуха высокого давления непосредственно в топливные каналы форсунки. Процесс вспенивания и мгновенного распыла смеси из жидкого топлива и воздушных пузырей позволяет эффективнее дробить топливную пленку за счет резкого увеличения объема воздуха на выходе из сопла форсунки.

На основе, ранее проведенных работ и анализа литературы, был разработан прототип форсунки, совмещающей в себе 2 принципа распыла.

Предварительно было намечено пять мест подачи барботирующего воздуха (см. рис. 1a).

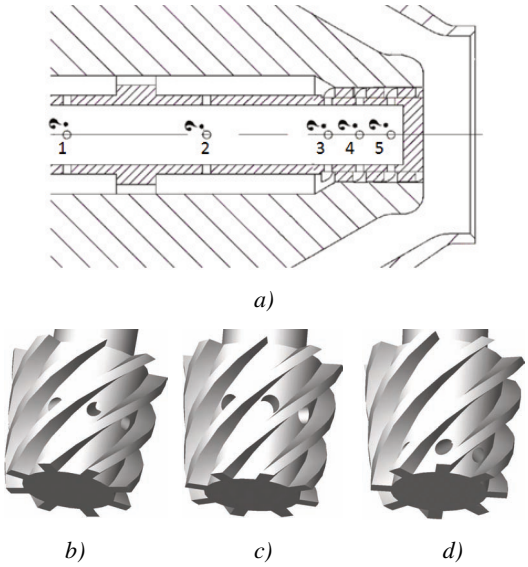


Рис. 1. Выбор положения, каналов барботирования.

Эксперименты показали следующие результаты. Размер капель при барботировании так же, как и при исключительно пневматическом распыливании, увеличивается с увеличением расхода топлива. Для того, чтобы размеры капель при эмульсионном распыливании оказались сопоставимыми с размерами, получаемыми при пневматическом распыливании, барботирующий воздух пришлось подать с перепадом давления в 8 и более раз превышающим перепад давления для пневматического воздуха. При добавлении пневматического воздуха результаты эмульсионного распыливания улучшаются.

На новой модели применялись шнеки с тремя вариантами отверстий барботирования (см. рис. 1b, рис. 1c и рис. 1d).

Совместная подача пневматического и барботирующего воздуха на режимах запуска позволяет примерно в два раза уменьшить размер капель. При дальнейшем увеличении перепада давления пневматический воздух начинает активно работать, приводя к еще более заметному снижению размера капель.

Таким образом, область применения метода вспенивания топлива воздухом ограничена режимами запуска и малого газа. Сложение потоков импульсов газа и жидкости обеспечивает лучшую стабильность топливовоздушного факела, а более продолжительное пребывание топлива в высокоскоростном воздушном потоке обеспечивает лучшее его распыливание и отсутствие сепарации капель по размерам. Широкий диапазон изменения расхода жидкости возможен в результате частичного запирания каналов подачи жидкости барботирующим воздухом.

На основе проведенных исследований спроектирован форсуночный модуль, комбинирующий в себе методы барботирования и пневмораспыла жидких топлив для малоэмиссионной камеры сгорания ГТД.

Улучшение качества распыла топлива в таком модуле приведет к повышению полноты сгорания на низких режимах, снижению эмиссии вредных веществ и предоставит возможность укорочения камеры сгорания по осевой длине.

Предполагается продолжение работы в двух направлениях:

1) более глубокие, исследования самого метода распыла барботированием;

2) определение конструктивных особенностей предлагаемого метода и его интеграцию в системы перспективных ТРДД.

Список литературы

1. AVIATION AND CLIMATE CHANGE. ICAO Environmental Report, Produced by the Environment Branch of the International Civil Aviation Organization (ICAO). 2016. 250 p.
2. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД // Перевод с англ. под ред. Дорошенко В.Е. М.: Мир. 1986. 566 с.

УДК 621.311.183

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛОНАСОСНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ С ВЕНТИЛЯЦИОННЫМ ПРОПУСКОМ

Вендланд Л.Е.[1,2], Гаврилова Ю.А.[3], Пугачук А.С.[1,4]

[1] Объединенный институт высоких температур РАН, Москва
[2] Российский Университет Дружбы Народов, Москва
[3] ПАО «Алмаз» им. акад. А.А. Расплетина, Москва
[4] МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

e-mail: vendlandl@gmail.com

Теплоэлектроцентраль (ТЭЦ) предназначена не только для генерации электроэнергии, но и для подачи горячей воды в центральную систему отопления и для бытовых нужд населения в зимнее время. Для генерации горячей воды на ТЭЦ используются теплофикационные турбины, которые в летнее и зимнее время работают в разных режимах.

Теплофикационная турбина в летний период работает в конденсационном режиме, в связи с тем, что выработки тепла в это время минимальны. В конденсационном режиме практически весь пар проходит все ступени турбины и сбрасывается в конденсатор, где снова охлаждается [1]. В зимнее время, когда требуется выработка тепла, начинают использовать теплофикационные отборы пара, такой режим работы называется теплофикационным. Для управления выработкой тепла в цилиндре низкого давления (ЦНД) турбины установлена регулирующая диафрагма. Когда возникает большая потребность в выработке тепла, регулирующую диафрагму максимально прикрывают и весь пар, за исключением вентиляционного пропуска (ВП), направляют в теплофикационные отборы.

Проточная часть ЦНД проектируется таким образом, чтобы максимально вырабатывать электроэнергию при работе в конденсационном режиме, вследствие чего, в теплофикационном режиме условия работы ЦНД не оптимальны [2]. При работе в теплофикационном режиме, мощность ЦНД может опуститься до нуля или перейти в вентиляционный режим работы, потребляя при этом вырабатываемую мощность [3]. Теплофикационный режим работы зависит от значения ВП и давления пара на выходе из ЦНД.

Если исключить ВП в теплофикационном режиме работы, то это приведет к разогреву оборудования и выходу из строя ЦНД, поэтому для охлаждения проточной части ЦНД необходим минимальный ВП. В свою очередь, использование ВП для охлаждения последних ступеней ЦНД турбины является нерациональным использованием уже существующих энергоресурсов.

С помощью использования теплонасосных установок, работающих на водяном паре (ТНУ) можно преобразовать существующее низкопотенциальное тепло в полезную работу пара, повысить экономичность использования топлива, повысить тепловой КПД паровых турбин и улучшить их экономические характеристики.

ТНУ в теплофикационных установках используют в качестве рабочего тела ВП. Компрессор ТНУ устанавливается после выхода теплофикационных турбин для отсоса вентиляционного пропуска.

Использование ТНУ в теплофикационном режиме позволяет уменьшить тепловые выбросы в атмосферу, так как вся энергия бросового тепла идет на разогрев сетевой воды. Это актуально, в связи с постоянным ростом общего потребления энергии, приводящим к увеличению тепловых выбросов в атмосферу.

С помощью использования ТНУ в теплофикационных установках можно рационализировать использование топлива, что может сократить топливные составляющие затрат на ТЭЦ.

Одним из решающих факторов достижения высокой эффективности энергоустановки ТНУ является получение при ее использовании максимально возможного коэффициента использования топлива (КИТ). Увеличение КИТ энергоустановки приводит к соответствующему снижению вредных тепловых выбросов в атмосферу.

Был проведен экономический расчет, который показал, что подключение ТНУ к одной из теплофикационных турбин Московской ТЭЦ-23 улучшает экономические показатели до 15 млн. руб. за один зимний период, Окупаемость работы составит около 5 лет.

Результаты работы позволили подтвердить целесообразность использования теплонасосных установок для утилизации энергии вентиляционного пропуска. В дальнейшем необходимо провести дополнительные исследования для определения оптимальных параметров ТНУ и минимальной величины вентиляционного пропуска, значение которого варьируется в пределах 2-15%, при которых увеличится КИТ, повысится тепловой КПД паровой турбины и улучшатся экологические характеристики.

Список литературы

1. Батенин В.М., Даценко В.В., Зейгарник Ю.А., Косой А.С., Синкевич М.В. Термодинамическая оценка возможности повышения экономичности теплофикационных турбин // Теплоэнергетика. № 1. 2016. С. 3–8.
2. Неуймин В.М. Эксплуатация турбин ТЭС на режимах с малыми объемными расходами рабочего пара. Особенности терминологии // Надежность и безопасность энергетики. № 1(20). 2013. С. 60–63.
3. Панов В.В. Определение повышения экономичности работы турбоустановки при утилизации тепла минимального пропуска пара в конденсатор с помощью парокомпрессионного теплового насоса // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудования. № 5. 2011. С. 76–82.

УДК 621.039.5:532

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБОРУДОВАНИЯ

Гантман М.Ю., Игрушкин С.И., Куликов Д.А., Леонтьев Н.И., Маслов М.Г., Смирнов В.А., Шмелев Е.И.

АО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород

e-mail: Gantmanmy1984@yandex.ru

Введение Акустическое проектирование различного оборудования до сих пор является и будет оставаться долгое время ключевым вопросом при создании новых образцов оборудования.

К настоящему времени, достижение необходимых требований по акустическому качеству изделий на этапах проектирования осуществляется за счет использования аналитических подходов, отработки технических решений при испытаниях «пассивных» физических моделей с имитацией источников с помощью вибровозбудителей колебаний, численных расчетов распространения колебаний на моделях исследуемых механоакустических систем с условным представлением о характере источника шумоизлучения.

Использование данных подходов при постоянном ужесточении требований к шумности изделий, вызывающих необходимость разработки новых технических решений, очевидно, становится менее эффективным. Альтернативным решением технологии акустического проектирования должен стать инструмент – численное моделирование, получившее в последние годы значительное развитие программных методов и аппаратной базы вычислительных средств.

В этой связи использование современных технологий цифрового двойника должно позволить повысить качество прогнозирования распространения шумоизлучения за счет полного цифрового описания источников колебаний, прежде всего гидро- и аэродинамической природы образования, интерпретации результатов испытаний натурных изделий и обеспечить взвешенный выбор новых технических решений, в том числе за счет использования автоматических компьютерных алгоритмов поиска геометрических и физических параметров конструкций, удовлетворяющих заданным требованиям.

Описание работы В работе представлены результаты численных расчетов моделирования турбулентного потока пара в проточной части запорной арматуры (см. рис.1).

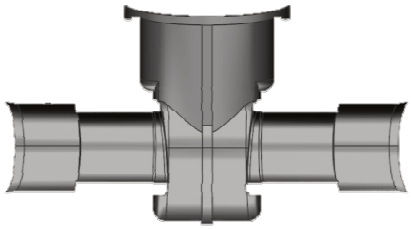


Рис. 1. Цифровая модель проточной части арматуры.

Моделирование турбулентности проводилось с использованием метода моделирования крупных вихрей (LES) с подсеточной моделью Смагоринского. На рис. 2 показано распределение скорости в сечении арматуры при числе Рейнольдса 10^6.



Рис. 2. Поле скорости.

Результаты численных расчетов аэродинамики течения в арматуре позволили установить связь отрывных периодических процессов в проточной части с выделенными узкополосными подъемами АЧХ вибрации в точке на корпусе.

Выводы Использование технологий цифрового двойника позволяет повысить качество интерпретации результатов натурных испытаний паровой запорной арматуры и локализации источников возмущения, а также разработку компенсирующих мероприятий.

УДК 536.242

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССООБМЕНА ПРИ ИСПАРЕНИИ ПЛЕНКИ ВОДЫ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ КАНАЛЕ

Горбачев М.В.[1], Терехов В.И.[1,2]

[1] Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск
[2] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

e-mail: max_friend@ngs.ru

Исследование процессов конвективного тепломассообмена при течении пленки воды со спутным потоком влажного воздуха представляет большой интерес. Такая организация течения применяется во многих теплообменных аппаратах испарительного типа.

В настоящей работе рассматриваются вопросы численного моделирования процессов тепло – и массообмена при испарительном охлаждении в горизонтальном канале с учетом конечной толщины пленки воды (рис. 1).

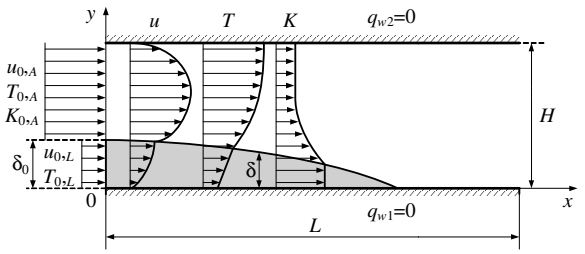


Рис. 1. Расчетная схема.

Допущения, принятые при создании математической модели принимались следующими:
– режимы течения пленки воды и влажного ламинарные. Волновые эффекты не учитывались;
– стенки канала являлись адиабатными;
– парообразная смесь являлась идеальным газом;
– поверхностное натяжение пленки воды не учитывалось. Поверхность раздела фаз находится в термодинамическом равновесии и выполняются условия равенства температур, скоростей, тепловых потоков и касательных напряжений;
– радиационный теплообмен и вязкая диссипация не учитывались;
– продольная теплопроводность и диффузия пренебрежимо малы.

Математическая модель основана на решении системы дифференциальных уравнений в приближении пограничного слоя и включает в себя уравнения неразрывности, движения энергии и диффузии для газовой фазы (влажный воздух) и пленки воды.

Система дифференциальных уравнений совместно с граничными условиями решалась численно с использованием метода конечных разностей. Нелинейность дифференциальных уравнений устранялась методом простых итераций на каждом шаге интегрирования с точностью 10^{-5} %. Шаг по оси x принимался равномерным. По оси y используется равномерное сжатие сетки с коэффициентом сжатия 1,05. Тестовые вычислительные эксперименты показали, что оптимальный размер сетки составил 200x70x20 ячеек в продольном и поперечных (для пленки воды и воздуха) направлениях соответственно.

Численное исследование процессов тепло- и массообмена в канале проведено в широком диапазоне изменения входных параметров воздуха: температура $T_0 = 10 \div 40\,^{\circ}\mathrm{C}$, число Рейнольдса $\mathrm{Re}_A = 50 \div 1500$, относительная влажность воздуха $\varphi_0 = 0 \div 100\,\%$. Геометрические размеры канала: высота $H = 6$ мм, длина $L = 50H$.

Результатами численных исследований являлись основные термодинамические и теплогидравлические параметры жидкой и газообразных фаз, такие как: поля скоростей, температур и концентраций, локальные характеристики (числа Нуссельта, Шервуда, а также тепловые и массовые потоки).

В качестве примера на рис. 2 показаны зависимости изменения среднемассовых температур газовой и жидкой среды по длине канала.

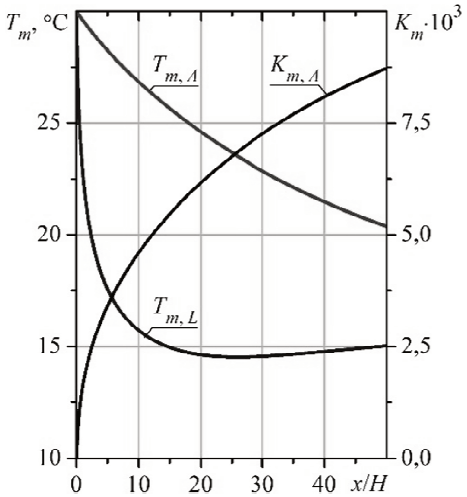


Рис. 2. Изменение среднемассовых параметров по длине канала: $\mathrm{Re}_A = 100$, $T_{0,A} = T_{0,L} = 30\,^{\circ}C$, $\varphi_0 = 0$.

За счет испарительных процессов среднемассовая температура газа понижается по длине канала. При этом средняя температура пленки также интенсивно снижается, но состояния насыщения не достигает. Это объясняется влиянием образующихся паров воды на подавление массообмена между газовой и жидкой фазами. В результате этого на кривой температуры пленки наблюдается слабо выраженный минимум. характеристик потоков. Отмечается большое разнообразие сценариев развития течения и тепломассообмена в зависимости от начальных параметров.

Работа поддержана РФФИ (грант № 20-08-00717 А)

УДК 536.24

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ДВУХКОМПОНЕНТНЫМ ПОТОКОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Демидов А.С., Тупотилов И.А., Захаренков А.В., Локтионов В.Д.

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва

e-mail: ZakharenkovAV@mpei.ru

Согласно прогнозам ожидается, что население Земли к середине 21 века достигнет 9-10 миллиардов. По оценкам академика Е.П. Велихова к этому времени мировое потребление энергии увеличится в несколько раз. Одним из перспективных направлений обеспечения потребности в таком колоссальном количестве энергии может стать термоядерная энергетика.

На сегодняшний день в разных станах созданы и эксплуатируются специально разработанные установки (токамаки и стеллараторы), основной целью которых является отработка различных систем и изучения процессов, необходимых для создания стационарно работающего термоядерного реактора.

Несомненно, одной из главных проблем в термоядерных экспериментальных установках является стационарное длительное удержание плазмы внутри камеры, но, наряду с этой глобальной задачей, возникает ряд технологических трудностей, которые в настоящее время еще не решены или требуют дополнительных исследований и обоснования возможности их использования.

Одной из таких проблем является создание надежной системы охлаждения высокотемпературных поверхностей, которое будет эффективно как в термоядерной энергетике будущего, так и в других отраслях промышленности.

Одним из наиболее многообещающих способов охлаждения высокотемературной поверхности является использование диспергированного двухкомпонентного потока теплоносителя. Получение дисперсной смеси капель обеспечивается за счет применения устройств, предназначенных для мелкого и, по возможности, равномерного распределения жидкости по сечению струи – «форсунок» –, которые к настоящему моменту обрели огромное количество всевозможных видов и конструкций, различающихся как по принципу своей работы, так и по назначению.

Для работы в этом направлении был создан экспериментальный стенд, состоящий из трех основных систем: нагрева, собранной на базе высокочастотного генератора ВЧ-60АВ, охлаждения, сбора и обработки информации, построенной на оборудовании L-Card.

Рабочий участок представляет собой трубку из нержавеющей стали 12Х18Н10Т с внешним диаметром 24 мм и внутренним 16 мм, длинной 100 миллиметров с установочными подводами. Измерение температуры стенки рабочего участка измерялось предварительно откалиброванными ХА термопарами. Для определения температурного поля по длине рабочего участка, а также плотности теплового потока через стенку термопары размещались как на внутренней, так и на внешней поверхности рабочего участка. Корольки термопар изолированы от потока теплоносителя пластинками толщиной 0.1 мм из нержавеющей стали и фиксировали температуру стенки рабочего участка.

Для охлаждения рабочего участка был спроектирован распределительный узел, основным элементом которого является пневматическая форсунка обеспечивающая формирование двухкомпонентного диспергированного потока теплоносителя (водовоздушная смесь) в различных пропорциях. Для подвода теплоносителя к рабочему участку и регистрации режимных параметров был создан контур охлаждения, принципиальная схема которого представлена на рис. 1.

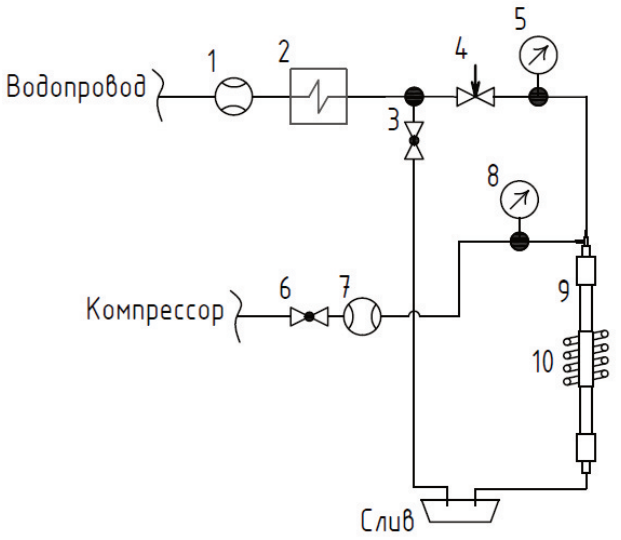


Рис. 1. Принципиальная схема контура охлаждения рабочего участка: 1, 7 – ротаметры; 2 – контурный нагреватель; 3, 4, 6 – регулировочная и запорная арматура; 5, 8– датчики давления; 9 – рабочий участок; 10 – индуктор.

Экспериментальные данные были получены в следующем диапазоне режимных параметров теплоносителя: массовый расход воздуха и воды $G_{возд}$ = 5,0÷9,0 м^3/час, $G_{воды}$ = 50÷250 л/час; давление воздуха и воды $p_{возд}$=(1,0÷6,0)·10^5 Па, $p_{воды}$=(1,0÷4,0)·10^5 Па. Также измерялась электрическая мощность ВЧ-генератора.

Первичный анализ полученных результатов показал эффективность данного метода охлаждения.

Работа поддержана РНФ (соглашение № 19-79-00271 от 30.07.2019)

УДК 621.039.533.6

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЛЬНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В КАНАЛЕ С МОНОСЛОЙНОЙ ШАРОВОЙ ЗАСЫПКОЙ

Дехтярь Р.А.[1,2], Овчинников В.В.[1]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
[2] Новосибирский государственный университет

e-mail: dekhtyar@itp.nsc.ru

Шаровые слои широко используются в геологии, нефти и газодобыче, в энергетике, различных промышленных системах, таких как ядерные реакторы с газовым охлаждением, процессы сушки, каталитические реакторы, процессы, включающие в себя транспирационное охлаждение и в высокоэффективной криогенной изоляции. Так как большинство этих процессов связаны с передачей энергии, правильное знание тепловых свойств материалов, особенно эффективной теплопроводности, необходимо для правильного проектирования таких тепловых систем. Кроме того, тщательное знание пористой структуры в зернистом слое важно для моделирования эффективной теплопроводности в пристенной области [1]. Эта информация имеет особое значение при разработке и эксплуатации высокотемпературных ядерных реакторов с зернистым слоем [2]. Изучение закономерностей протекания процессов теплопроводности является задачей данного исследования.

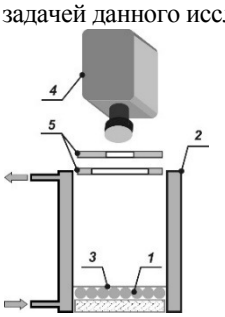


Рис. 1 Схема экспериментальной установки: 1 – монослой шаровой засыпки, 2 – термостат, 3 – вода, 4 – тепловизор, 5 – экраны.

Эксперименты проводились на установке, представленной на рис. 1. Единичный слой сфер *1* укладывался на фторопластовую пластину толщиной 0,5 мм внутри водяного термостата *2* из нержавеющей стали с диаметром внутреннего цилиндра 129,4 мм. Упаковка сфер заливалась дистиллированной водой *3* до уровня на 0,1 мм выше диаметра шара. Для измерения температуры поверхности засыпки сфер использовался тепловизор *4* марки NEC TH7100. Для уменьшения внешнего теплового излучения на точность измерения температуры между объективом тепловизора и засыпкой устанавливались теплоотражающие экраны *5* из полированного алюминия с центральными отверстиями разного диаметра. До заливки водой упаковка сфер фотографировалась, и по фотографиям определялись геометрические характеристики упаковки. Опыты проводились со сферами из стекла марки ЛК-3 диаметром 8,85 мм, 16,0 мм и шариками из полиоксиметилена (ПОМ) диаметром 9,0 мм. После подачи жидкости в оболочку термостата в течении 20-30 секунд на поверхности внутреннего цилиндра термостата устанавливалась постоянная температура. В ходе опытов температура стенки поддерживалась постоянной с точностью ±0,2°C.

Теплопроводящие характеристики единичного монослоя сфер в неподвижной жидкости исследовались в режиме прогрева (охлаждения) слоя при ступенчатом изменении температуры на внешнем периметре засыпки.

Исследование показало, что существует особенность прогрева разного типа засыпок. Время прогрева очень сильно зависит от направления теплового потока на стенке термостата, а именно: при нагреве время прогрева значительно меньше, чем при охлаждении. На рис. 2 показано изменение температуры в центре засыпки от времени (значки) и кривые – зависимость от характерного времени τ. Приведены данные для случаев, когда перепад температур для нагрева и охлаждения одинаков. Из рисунка видно, что при прогреве характерное время τ – 145-400 сек и зависит от теплопроводности засыпки λ (*1* – λ= 0,440, *3* – λ= 0,669, *5* – λ= 0,666 Вт/(м·К)). При охлаждении τ – 600-1600 сек и зависит от диаметра сферы (кривые *4* и *6*). Однако τ заметно слабее зависит от теплопроводности засыпки (кривые *2* и *6*) и определяется количеством тепла необходимого на охлаждение засыпки (кривая *2* – $C_p \cdot m$ = 367 Дж/К, а кривая *6* – $C_p \cdot m$ = 351 Дж/К). В тоже время стоит отметить, что τ для стеклянных шаров не определяется теплом охлаждения (кривая *4* – $C_p \cdot m$= 627 Дж/К, а кривая *6* – $C_p \cdot m$ = 351 Дж/К).

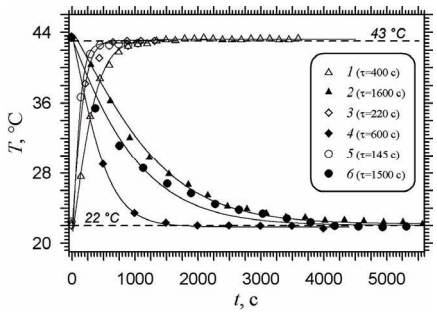


Рис.2. Изменение температуры в центре засыпки. 1 – d=9 мм (ПОМ, нагрев), 2 – d=9 мм (ПОМ, охлаждение), 3 – d= 16 мм (стекло, нагрев), 4 – d= 16 мм (стекло, охлаждение), 5 – d= 8,85 мм (стекло, нагрев), 6 – d= 8,85 мм (стекло, охлаждение).

Список литературы

1. Дехтярь Р.А., Сиковский Д.Ф., Горин А.В., Мухин В.А. Теплообмен в зернистом слое при умеренных числах Рейнольдса // ТВТ. 2002. Т.40. № 5. С. 748–755.
2. Van Antwerpen W., du Toit C.G. and Rousseau P.G. A review of correlations to model the packing structure and effective thermal conductivity in packed beds of mono-sized spherical particles // Nuclear Engineering and Design. 2010. V. 240. No. 7. P. 1803–1818.

Работа выполнена в рамках госзадания ИТ СО РАН

УДК 621.039

ВЕРИФИКАЦИОННЫЕ РАСЧЕТЫ ПО ПС FLOWVISION ДЛЯ ВТГР

Диденко Д.В.[1], Никаноров О.Л.[1], Рогожкин С.А.[1], Аксенов А.А.[2], Жестков М.Н.[2]

[1] АО «ОКБМ им. И.И. Африкантова», Нижний Новгород
[2] ООО «ТЕСИС», Москва

e-mail: nti@okbm.nnov.ru

В настоящее время в АО «ОКБМ Африкантов» ведутся активные работы по верификации программного комплекса вычислительной гидродинамики FlowVision [1] с целью его дальнейшей аттестации для обоснования безопасности высокотемпературных газоохлаждаемых реакторных установок (ВТГР). Программный комплекс FlowVision предназначен для численного моделирования трехмерных ламинарных и турбулентных, стационарных и нестационарных изотермических и неизотермических течений жидкости и газа. Одним из способов верификации программного средства (ПС) является сравнение полученных по нему результатов расчета с эксплуатационными данными реальных реакторных установок.

В данной работе приводится описание теплогидравлических расчетов системы охлаждения корпуса японского высокотемпературного исследовательского реактора HTTR (High Temperature Engineering Test Reactor) при его работе на мощности 9 МВт и номинальной мощности 30 МВт. Расчеты проводились согласно данным, представленным в международной координационной программе исследований МАГАТЭ [2, 3].

Система охлаждения корпуса реактора состоит из верхней, боковой и нижней панелей, представляющих собой набор вертикально и горизонтально расположенных теплообменных труб, в которых организована принудительная циркуляция воды. Для улучшения теплоотвода от корпуса реактора в боковых панелях предусмотрен набор из вертикально расположенных стальных листов (тепловых экранов) с выполненными в них по высоте щелевыми отверстиями (см. рис.1). Стоит отметить, что сверху и снизу полости между экранами закрыты стальными листами, для образования замкнутого контура естественной циркуляции воздуха в ограниченном пространстве.

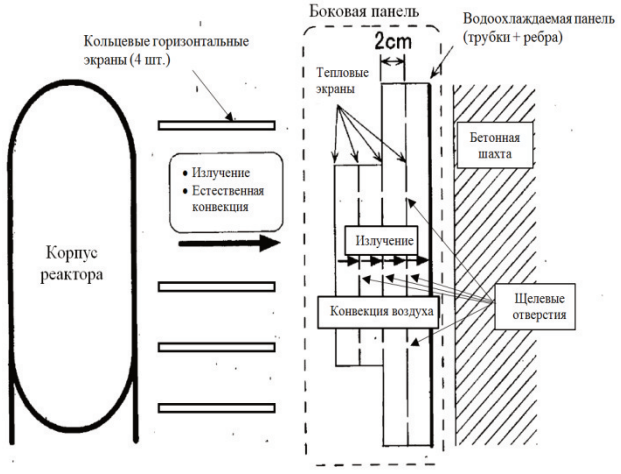


Рис.1. Схема отвода тепла от корпуса реактора HTTR через боковую панель системы охлаждения.

На рис.1 также изображены кольцевые горизонтальные экраны, разделяющие пространство между корпусом реактора и бетонной шахты на пять областей. По результатам выполненных расчетов было показано влияние данных экранов на процесс теплообмена в шахте реактора.

Для выполнения верификационных расчетов разработаны геометрическая и расчетная модель одной секции системы охлаждения корпуса реактора (сектор 30°).

В реакторе моделируется турбулентное течение теплоносителя (гелия) и передача тепла через корпус реактора, причем активная зона не моделируется явным образом. Отвод тепла от корпуса реактора к тепловым экранам происходит за счет естественной конвекции воздуха и излучения в полости бетонной шахты.

В качестве критериев сравнения были выбраны:
– значение тепловой мощности, отводимой системой охлаждения корпуса реактора;
– температурный профиль на поверхности корпуса реактора;
– температурный профиль на поверхности боковых панелей системы охлаждения корпуса реактора.

Сопоставление результатов стационарных расчетов, полученных с помощью ПС FlowVision, показало хорошее качественное совпадение с экспериментальными данными для двух значений мощности реактора (9 и 30 МВт). Погрешность расчета для значения тепловой мощности, отводимой системой охлаждения, составила 29 %, а погрешность температуры на корпусе реактора и боковой панели 4 и 8 % соответственно.

Выполненные верификационные расчеты показали, что с помощью программного комплекса FlowVision можно успешно решать сложные задачи теплопереноса при наличии трех различных рабочих сред (гелий, воздух, вода) в одной расчетной модели, а также в условиях сложного теплообмена (вынужденная и естественная конвекция, излучение).

Список литературы

1. Рогожкин С. А., Осипов С. Л., Фадеев И. Д., Шепелев С. Ф., Аксенов А. А., Жлуктов С. В., Сазонова М. Л., Шмелев В. В. Численное моделирование теплогидравлических процессов в верхней камере быстрого реактора // Атомная энергия. 2013. Т. 115. Вып. 5. С. 295–298.
2. IAEA-TECDOC-1382 Evaluation of high temperature gas cooled reactor performance: Benchmark analysis related to initial testing of the HTTR and HTR-10. 2003.
3. Benchmark problems for rise-to-power test of high temperature engineering test reactor in IAEA coordinated research program. (Part II. Evaluation of performance of Vessel Cooling System) Akio Saikusa, Yukio Tachibana and Kazuhito Kunitomi. Japan Atomic Energy Research Institute. 2000.

УДК 621.352.6

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИЗИСА ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В МЕТАЛЛОГИДРИДНОМ РЕАКТОРЕ

Дуников Д.О., Блинов Д.В., Борзенко В.И.

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

e-mail: ddo@mail.ru

Развитие возобновляемой и распределенной энергетики невозможно без создания эффективных систем аккумулирования энергии. Водород рассматривается в качестве эффективного, гибкого и экологически чистого энергоносителя, пригодного для безопасного и долговременного аккумулирования энергии. Перспективным способом хранения водорода для использования в интеграции с энергоустановками на топливных элементах является его аккумулирование в твердофазном связанном состоянии с помощью гидридов металлов [1].

Особенностью металлогидридов является экспоненциальная зависимость равновесного давления водорода от температуры. Рост температуры, связанный с выделением теплоты реакции гидрирования, приводит к резкому росту давления в системе, что служит причиной остановки реакции и нарушения нормального функционирования металлогидридного реактора, т.е. к кризису тепломассопереноса [2].

Точное описание процессов в металлогидридных устройствах представляет собой трудную и до сих пор окончательно не решенную задачу, созданию математических моделей посвящено множество работ. В то же время для некоторых случаев упрощенной постановки задачи оказывается возможным найти аналитическое решение.

Нами рассмотрен тепломассоперенос в металлогидридном реакторе со следующими допущениями: реактор заполнен сплавом массой m и теплоемкостью C_p, тепловой эффект реакции гидрирования ΔH, температура T в реакторе однородна, давление равно равновесному давлению водорода над сплавом $p = p_s(T)$; взаимодействие с теплообменником площадью A и температурой T_0 определяется обобщенным коэффициентом теплоотдачи α, расход q водорода постоянен. Эти допущения справедливы для металлогидридного реактора, работающего в докризисном режиме. Эволюция температуры в этом случае:

$$T - T_0 = \frac{\Delta H\ q}{\alpha A}\left[1 - \exp\left(-\frac{\alpha A}{C_p m\ (1+B)}t\right)\right] \qquad (1)$$

где коэффициент B характеризует отношение термической массы реактора к термической массе металлогидрида. Используя PCT диаграмму сплава можно с помощью (1) рассчитать эволюцию давления. Условием кризиса является равенство давлений в реакторе и во входной линии, в этом случае поток водорода останавливается.

Экспериментальная проверка выполнена с использованием металлогидридного реактора РХО-3, техника эксперимента описана в [3], площадь теплообменника $A = 0.337$ м^2, $B = 1$, охлаждение водой $T_0 = 17.5$°C. Сплав $LaNi_{4.8}Mn_{0.3}Fe_{0.1}$, m = 5 кг, C_p, = 420 Вт/Дж К, ΔH = 34 кДж/моль, PCT диаграмма и ее аппроксимация представлена в [4].

На рис. 1 представлены результаты эксперимента по зарядке реактора водородом q = 60 норм.л/мин и сравнение давления в реакторе с расчетным. Температура рассчитывалась по (1), давление определялось по аппроксимации PCT диаграммы [4].

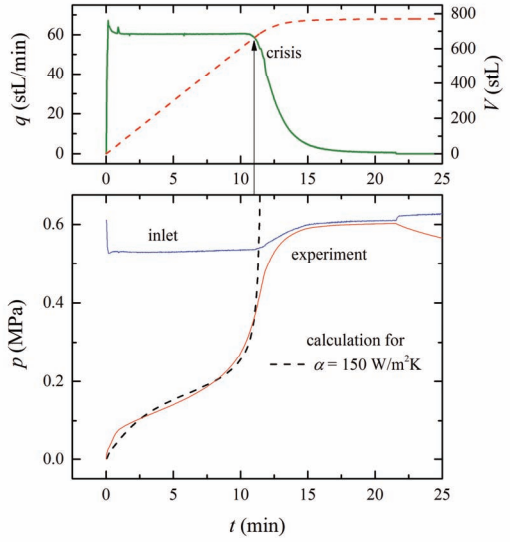


Рис. 1. Сравнение результатов эксперимента и расчета.

Как оказалось, предложенная методика расчета позволяет с хорошей точностью предсказывать время наступления кризиса тепломассопереноса в реакторе. Расчетное давление близко к измеренному и сравнивается с давлением во входной линии в момент кризиса, когда реактор уже не может поддерживать постоянный расход водорода при зарядке. Следует отметить, что такой расчет справедлив только для изотермических засыпок, что характерно для тонких интенсивно охлаждаемых слоев металлогидрида. Засыпка сплава в РХО-3 имеет толщину 10 мм и охлаждается проточной водой, таким образом, указанное условие выполняется, и в результате наблюдается согласие расчета и эксперимента.

Список литературы

1. Hirscher M., Yartys V.A., Baricco M., et al. Materials for hydrogen-based energy storage – past, recent progress and future outlook // Journal of Alloys and Compounds. 2020. V. 827. Art. 153548.
2. Борзенко В.И., Дуников Д.О., Малышенко С.П. Кризисные явления в металлогидридных устройствах хранения водорода // ТВТ. 2011. Т. 49. No 2. С. 256–264.
3. Blinov D.V., Borzenko V.I., Dunikov D.O., Romanov I.A. Experimental investigations and a simple balance model of a metal hydride reactor // International Journal of Hydrogen Energy. 2014. Т. 39. No 33. P. 19361–19368.
4. Dunikov D., Blinov D. Extraction of hydrogen from a lean mixture with methane by metal hydride // International Journal of Hydrogen Energy. 2020. Т. 45. No. 16. P. 9914–9926.

Работа поддержана РНФ (проект № 17-19-01738)

УДК 620.9

МОДЕРНИЗАЦИЯ ТИПОВЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ОТБОРА ПРОБ ВОДЫ И ПАРА В СИСТЕМАХ ХИМИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ТЭС

Егошина О.В., Звонарева С.К.

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

e-mail: sofi.zvonareva@yandex.ru

По отечественным и зарубежным данным[1] до 60% всех случаев вынужденных остановов энергоблоков связано с нарушением качества воды и пара. Внезапные или кратковременные нарушения качества воды или пара могут быть надежно зафиксированы только при непрерывном отборе проб и наличии автоматических аналитических приборов непрерывного действия. Важнейшим требованием к отбору пробы является представительность пробы, она достигается выбором конструкции и места расположения пробоотборных устройств.

В настоящее время основными источниками, раскрывающими теоретические основы оснащения паровых стационарных котлов устройствами для отбора проб пара и воды, являются руководящие документы по стандартизации [2].

При отборе пробы должно соблюдаться три условия: Первое – представительность пробы, Второе – поддержание расхода не менее 60 кг/ч. Доказано, что при изменении расхода погрешность определения состава рабочей среды может составить: по меди – 400%, по железу до 200%, по натрию до 70%. При увеличении расхода с 40 до 60 л/ч, погрешность уменьшается до 30-60% [1]. Исходя из вышеизложенного, можно заключить: особое внимание должно быть обращено на обеспечение требуемого расхода пробы. Третье условие – входное сечение зонда выбирают таким, чтобы скорость входа пара в него равнялась скорости пара в пароотводящей трубе при номинальной нагрузке котла. Используемые на данный момент типовые пробоотборные устройства не обеспечивают требуемый расход 60 кг/ч.

В рамках работы исследована необходимость модернизации типовых устройств отбора проб перегретого пара и были определены: действительный расход отбираемой пробы существующего пробоотборного устройства, требуемый диаметр пробоотборного зонда для обеспечения расхода пробы 60 кг/ч, также были разработаны номограммы, позволяющие определить диаметр входного сечения пробоотборного устройства для обеспечения необходимого расхода пробы.

Объектом исследования являлся перегретый пар трехконтурного котла-утилизатора П-133 на парогазовой установке. Для каждой точки был рассчитан действительный расход пробы на входе в пробоотборное устройство: расход пробы контура низкого и среднего давления не достигает требуемого значения расхода – 60 кг/ч, составляет соответственно 8 и 33 кг/ч, тогда когда расход пробы высокого давления является избыточным – примерно в 2,5 раза выше требуемого. Полученные результаты приводят к нарушениям в работе систем автоматического и лабораторного химического контроля, а именно недостоверности измерений показателей качества перегретого пара в результате недостаточного расхода пробы.

В данной работе предлагается рассмотреть возможность модернизации типовых устройств для отбора проб воды и пара в системах химического контроля на ТЭС с учетом отбора пробы теплоносителя для различных уровней давлений.

Были разработаны номограммы, которые позволяют определить необходимый диаметр входного сечения пробоотборного устройства по расходу и диаметру в основном трубопроводе. На рисунке 1 представлена номограмма для трехконтурного котла-утилизатора.

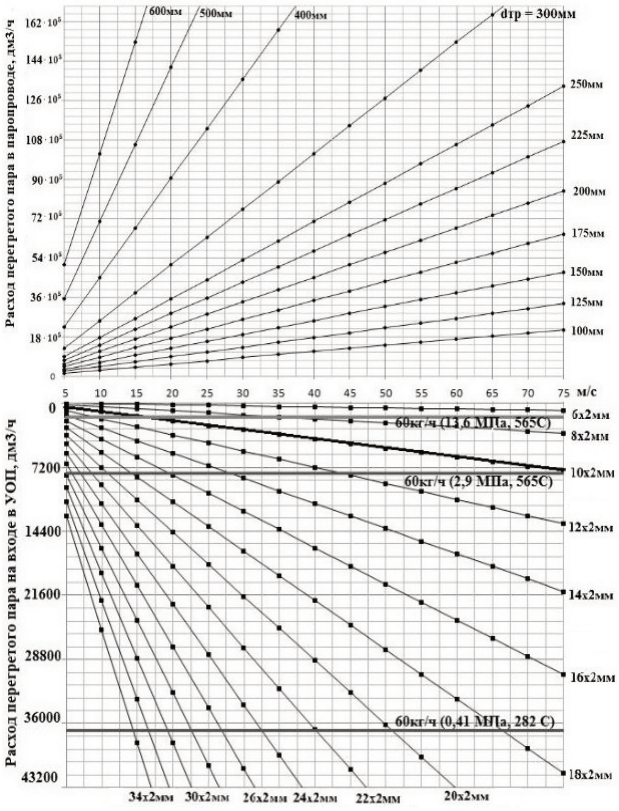


Рис. 1. Номограмма для определения требуемого диаметра входного сечения пробоотборного устройства для трехконтурного котла-утилизатора.

Список литературы

1. Принципы создания и опытно-промышленное внедрение систем химико-технологического мониторинга на электростанциях. Заключительный отчет: НИР / Моск. энерг. ин-т (МЭИ ТУ). Кафедра технологии воды и топлива (ТВТ). Рук. темы Воронов В.Н. 2006. 21 с.
2. 24.031.121-2012 Методические указания. Оснащение паровых стационарных котлов устройствами для отбора проб воды и пара. ОАО «ЦКТИ». 2012.

УДК 621.577.2

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОНАСОСНОЙ УСТАНОВКИ С ВЕРТИКАЛЬНЫМ ГРУНТОВЫМ ТЕПЛООБМЕННИКОМ ВЕЕРНОГО ТИПА В УСЛОВИЯХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Елистратов Д.С.

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

e-mail: elistratov_d@mail.ru

Теплонасосные системы теплоснабжения с грунтовыми теплообменниками получили широкое распространение за рубежом в регионах с относительно теплыми климатическими условиями. Использование этой технологии в российских природно-климатических условиях имеет свои особенности. Ошибки при их проектировании и эксплуатации могут привести к снижению эффективности теплоснабжения, а в некоторых случаях и к преждевременному выходу из строя оборудования. Ситуация, когда количество тепла, отбираемое грунтовым зондом, значительно превышает количество тепла, поступающего из недр земли, может привести к существенному понижению температуры теплоносителя на входе в тепловой насос. Это приводит к снижению коэффициента преобразования теплового насоса и технико-экономических показателей эффективности всей системы теплоснабжения.

Температура грунта на глубине более 20 метров стабильна на протяжении всего года и равна 8–10°С. Для отбора от грунта тепловой энергии обычно используют вертикальные грунтовые теплообменники, называемые «зондами», которые погружают в скважины глубиной 20–300 м и диаметром 120–200 мм. Значения теплосъема от грунта зависят от его состава и влажности (табл. 1).

Таблица 1. Удельные показатели теплосъема для одиночных вертикальных грунтовых зондов.

Вид грунта	Теплосъем, Вт/м
Сухие осадочные породы	20
Сухой песок, гравий	25
Влажный песок	35-40
Каменистая почва, насыщенная водой, влажная глина	40-50
Известняк	50-60
Гранит	60-80
Грунтовые воды	80-100

Объектом экспериментального исследования стала теплонасосная установка (ТНУ) тепловой мощностью 12 кВт для отопления индивидуального жилого дома в п. Морозово Искитимского района Новосибирской области. Компактный грунтовый теплообменник состоит из 12 U-образных зондов, выполненных из полипропиленовой трубы с проходным сечением 32 мм, которые под углом 30° расходятся в сухой грунт на глубину 40 метров. В верхней части зонды своими входными и выходными трубопроводами соединены в общие коллекторы, от которых незамерзающий теплоноситель (водный раствор пропилен гликоля) поступает в испаритель теплового насоса и обратно от него в грунтовый теплообменник.

Продолжительность отопительного сезона в г. Новосибирске составляет ~5520 часов. Среднее значение ежесуточного потребления жилым домом тепловой энергии в этот период составляет ~6 кВт·ч. При коэффициенте преобразования φ ~3,0 потребление геотермальной тепловой энергии, за отопительный сезон составляет ~22080 кВт·ч. Согласно исследованиям, проведенным в работе [1], геотермальные теплопритоки на глубине более 20 метров составляют ~0,03 Вт/м^2. Общая площадь конуса, образованного расходящимися под углом 30° от нормали к поверхности грунтовыми зондами, составляет 3768 м^2.

Соответственно ежечасно к грунтовому теплообменнику поступает 0.113 кВт·ч геотермальной тепловой энергии, а в целом за отопительный сезон 623.76 кВт·ч.

Данных теплопритоков явно недостаточно для компенсации тепла, отбираемого грунтовыми зондами. Это привело к тому, что эксплуатация ТНУ с вертикальным грунтовым коллектором без отогрева низкопотенциального земляного контура на протяжении 5 лет привела к частичной просадке грунта, которая, в свою очередь, вызвала разрушение 3 из 12 зондов.

Замеры температуры теплоносителя, поступающего из грунтового контура в тепловой насос в начале каждого из отопительных сезонов, показали падение температуры на ~3°С ежегодно, от 8°С в первый год, до –4°С на пятый год эксплуатации. Проведенные исследования показали, что подземный контур ТНУ, составленный из конусообразного веера U-образных труб, не успевает отогреваться за короткий летний период в климатические условия юга Западной Сибири.

Во избежание возникновения таких ситуаций при проектировании грунтовых коллекторов рекомендуется использовать доступные дешевые технологии для отогрева зондов. Например, это может быть тепло от солнечных коллекторов, а в летний период можно утилизировать тепло, отводимое из строений системами кондиционирования. Необходимо также учитывать особенности местности и грунта, так как геотермальные сезонные теплопритоки могут сильно различаться в зависимости от характеристик грунта и географического местоположения участка и, на котором расположен грунтовый теплообменник.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что при использовании ТНУ с вертикальным грунтовым теплообменником, необходимо в общем случае отогревать подземный контур, либо при проектировании закладывать больший запас общей длины и глубины для зондов низкопотенциального контура, что связано с дополнительными затратами.

Список литературы

1. Фортов В.Е. Возобновляемые источники энергии на энергетической сцене мира / Фортов В.Е., Шпильрайн Э.Э. // Труды Международной конференции «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы». Т. 1. Махачкала. 2005.

УДК 621.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ НА БАЗЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ГТУ

Железнов А.П., Птахин А.В., Крылов В.С., Петрушин А.А.

ЗАО «НПВП «Турбокон», Калуга

e-mail: alexej.zheleznov2016@yandex.ru

Для обеспечения собственных нужд компрессорных станций (КС) магистральных газопроводов внедряются утилизационные энергокомплексы (УТЭК) генерирующие электрическую и/или тепловую энергию за счет утилизации выхлопных газов газотурбинной установки (ГТУ) газоперекачивающих агрегатов (ГПА). На сегодняшний день активно разрабатываются и внедряются утилизационные установки за рубежом, такими компаниями как Turboden, ORMAT, MHI и др. [2].

Одной из важных особенностей цикла парогазовой утилизационной установки (ПГУ) является замещение традиционного цикла Ренкина в паротурбинной части ПГУ на органический цикл Ренкина (ОЦР), в котором используется органическое рабочее тело (ОРТ).Данная мера позволяет получить более высокий термический КПД цикла ПГУ, а также позволяет избежать замерзания рабочего тела (РТ) в конденсаторах утилизационных установок при эксплуатации в Северных регионах, что обусловлено низкой температурой насыщения ОРТ.

Проведен расчет тепловой схемы УТЭК на базе КС, представленной на рисунке 1. Расчет проведен для различных РТ, с целью подбора оптимального.

В качестве греющей среды для ОРТ УТЭК используется промежуточный контур с диатермическим маслом АМТ-300. По исходным данным полученным по результатам расчетов теплоутилизатора получено, что тепловая мощность, передаваемая от масла к ОРТ составляет Q = 34,2 МВт.

В качестве ОРТ были рассмотрены следующие варианты: фреон R-11, R-113, R-114, R-245fa, изобутан. Также для сравнения проведены расчеты цикла с использованием в качестве рабочего тела воды. Расчет проводился при следующих параметрах: t_0=200˚С, p_0=1МПа, $t_к$=30˚С. Внутренний КПД турбины η_{0i}=0,82.

В результате исследования получены значения термического КПД цикла для различных ОРТ и представлена в таблице 1. На основании проведенного исследования в качестве рабочего тела для проектируемого УТЭК выбран фреон R-113.

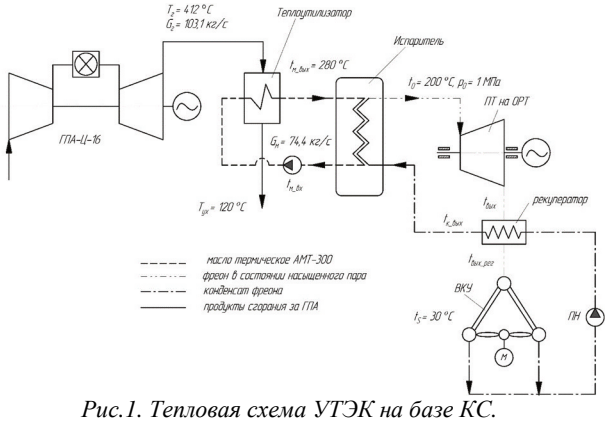


Рис.1. Тепловая схема УТЭК на базе КС.

Таблица 1. Значения термического КПД ОЦР для УТЭК.

	R-11	R-113	R-114	R-245fa	Изобутан	Вода
Теримческий КПД η_t	0,162	0,189	0,09	0,177	0,143	0,074

Список литературы

1. Белов Г.В., Дорохова М.А. Органический цикл Ренкина и его применение в альтернативной энергетике // Электронный научно- технический журнал, №2 февраль 2014. DOI: 10.7463/0214.0699165.
2. Technoeconomic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems / S. Quoilin, M. Van Den Broek, S. Declaye et al. // Renewable a Sustainable Energy Rewiews. 2013. V. 22. P. 168–186.

УДК 662.6

ИЗУЧЕНИЕ МИНЕРАЛЬНОЙ ЧАСТИ БИОМАССЫ В ПРОЦЕССЕ ЕЕ СЖИГАНИЯ

Ибраева К.Т., Заворин А.С.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

e-mail: kti1@tpu.ru

Вовлечение биомассы в топливно-энергетический баланс позволяет снизить выброс вредных веществ от энергетических объектов. Для обеспечения эффективного сжигания сырья необходимо комплексное изучение характеристик топлива. При проектировании энергетического оборудования необходимо учитывать не только органическую часть топлива, но и минеральную часть, которая оказывает влияние на внутритопочные процессы и надежность эксплуатации. Например, небольшое содержание минеральной части в биомассе приводит к шлакованию поверхностей нагрева, в результате чего снижается КПД и ресурс работоспособности котлоагрегата. В некоторых случаях наблюдаются отложения, образующиеся за счет плавления и спекания золы, которые уменьшают теплопередачу и надежность работы поверхностей нагрева котельного оборудования. В связи с этим требуется подробное изучение характеристик органической и минеральной частей биомассы для ее эффективного энергетического использования.

В качестве объектов исследования рассмотрены отходы зернопереработки (пшеничные отруби) с одного из наиболее крупных мукомольных предприятий Сибирского Федерального округа, а также высокоминерализованный торф с месторождения Суховское (Томская область).

Из полученных результатов теплотехнических характеристик следует, что исследуемый торф имеет высокую зольность (A^d = 22,8 %), большая часть которая образована продуктом разложения карбоната кальция. Результаты по отрубям показали, что их зольность (6,9 %) сопоставима со средней зольностью травянистой и сельскохозяйственной биомассы (8,0 %) [1]. Нелетучий остаток, полученный после определения выхода летучих из пшеничных отрубей при 900°С без доступа воздуха, имел сплавленный вид, в случае торфа – нелетучий остаток носил порошкообразный характер.

Исследование состава минеральной части пшеничных отрубей проводили методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием спектрометра EDX-720-P (Shimadzu, Япония). В ходе анализа было выявлено, что у отрубей наибольшее содержание среди элементов наблюдается у натрия, магния, калия, а содержание железа и кальция относительно мало (не превышает 0,1 %). Анализируя состав элементов можно отметить, что спекание коксового остатка отрубей связано с плавлением хлоридов натрия, калия и магния. Данные соединения имеют температуру плавления ниже, чем температура определения выхода летучих веществ (900°С). Кроме того, калий и натрий в сочетании с хлором и серой играют главную роль в механизмах коррозии. Эти элементы частично переходят в газовую фазу в процессе горения, образуя хлориды и сульфаты щелочных металлов, которые конденсируются на поверхностях теплообменника [2]. Полученные результаты исследования плавкостных характеристик показывают, что отруби имеют легкоплавкий вид золы, температура плавления золы отрубей не превышает 820°С. Высокие значения калия, отмеченные у отрубей, в сочетании с кремнием согласно [3], могут привести к образованию легкоплавких соединений.

Результаты рентгенофлуоресцентного анализа показали, что основными элементами минеральной части суховского торфа являются кальций, натрий и магний. Учитывая высокую долю диоксида углерода карбонатов можно сделать вывод, что карбонаты торфа в основном представлены кальцитом. По результатам характерных температур плавкости золы, можно отметить, что зольный остаток торфа имеет тугоплавкий характер (более 1500°С).

В работе [4] показан метод создания топливных композиций для предотвращения образования шлаковых отложений при сжигании биомассы. В связи с этим были проведены эксперименты по смесевому сжиганию торфа с высоким содержанием карбоната кальция и низкоплавких пшеничных отрубей в различных соотношениях. В ходе анализа выявлено, что после озоления при 815°С смесевых топлив с добавлением 5 % масс. и более торфа, не наблюдалось спекания их зольного остатка.

Добавление торфа к отрубям повысило температуру плавления золы (t_c) полученного смесевого топлива на 265°С. Это возможно объяснить тем, что находящийся в торфе кальций растворяется в расплавах силикатов калия в составе отрубей, высвобождая последний в газовую фазу. В результате кремний вступает в реакцию с кальцием с последующим образованием силикатов, имеющих высокую температуру плавления.

Полученные результаты показывают, что создание смесевых композитов из различных видов биомассы позволяет обеспечить эффективность их энергетического использования.

Список литературы

1. Vassilev S.V., Vassileva C.G., Song Y., Li W., Feng J. Ash contents and ash-forming elements of biomass and their significance for solid biofuel combustion // Fuel. 2017. V. 208. P. 377–409.
2. Magdziarz A., Dalai A.K., Kozińskic J.A. Chemical composition, character and reactivity of renewable fuel ashes // Fuel. 2016. V. 176. P. 135–145.
3. Thy P., Jenkins B.M., Grundvig S., Shiraki R., Lesher C.E. High temperature elemental losses and mineralogical changes in common biomass ashes // Fuel. 2006. V. 85, P. 783–95.
4. Wang L., Hustad J.E., Skreiberg Ø., Skjevrak G., Grønli M. A critical review on additives to reduce ash related operation problems in biomass combustion applications // Energy Procedia. 2012. V. 20. P. 20–29.

Работа поддержана РФФИ (грант № 19-38-90148)

УДК 504.06

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ ВЫБРОСОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Кондратьева О.Е., Росляков П.В., Локтионов О.А., Бурдюков Д.А.

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

e-mail: KondratyevaOYe@mpei.ru

С 2019 года все энергетические предприятия, отнесенные в соответствии с Постановлением Правительства от 28.09.2015 № 1029 к I категории негативного воздействия на окружающую среду, начали разработку систем непрерывного контроля выбросов (СНКВ) для обеспечения соответствия требованиям российского природоохранного законодательства и повышения экологичности технологического процесса.

Создание СНКВ является комплексной задачей, объединяющей как технические и организационные вопросы, связанные с необходимостью выбора методов газового контроля, определением места установки измерительных систем и обеспечения метрологических требований, так и вопросы экономической целесообразности и возможности последующего масштабирования разработанных схемных решений на другие энергетические объекты.

Для систематизации и уточнения государственных нормативных требований в последнее время был разработан широкий перечень подзаконных нормативно-правовых актов. Одним из основных документов, регламентирующих создание СНКВ, является Постановление Правительства от 13.03.2019 г. № 262. Данный документ устанавливает, что оснащению СНКВ подлежат только те стационарные источники, у которых в выбросах присутствует хотя бы одно из загрязняющих веществ в количестве, превышающем указанные в таблице 1 значения. То есть СНКВ должны быть установлены на всех дымовых трубах крупных ТЭС.

Таблица 1. Загрязняющие вещества в выбросах.

Наименование вещества	Массовый выброс, кг/ч
Взвещенные вещества	3
Серы диокисид	30
Оксиды азота	30
CO, как показатель полноты сгорания топлива	5
CO во всех остальных случаях	100

К самым сложным проблемам оснащения СНКВ энергетических объектов можно отнести: выбор места установки измерительной системы, определение методов измерения и выбор соответствующего оборудования, необходимость выполнения обязательных метрологических требований.

Для обеспечения достоверных измерений концентраций загрязняющих веществ в выбросах с учетом отклонений от среднего значения как скорости отходящих газов, так и концентраций в измерительном сечении, в Национальном исследовательском университете «МЭИ» (НИУ «МЭИ») было проведено компьютерное моделирование и численные исследования процессов перемешивания продуктов сгорания в стволах различных дымовых труб в зависимости от конструктивных и режимных факторов.

В результате проведенных исследований определено, что для обеспечения достоверности измерений при подводе в дымовую трубу газов, отличающихся по составу не более чем на 20% от средней величины, измерительная система должна быть установлена на расстоянии не менее 14 эквивалентных диаметров от верхней кромки разделительной перегородки. На практике встречаются ситуации, когда отсутствует техническая возможность обеспечения данного условия. В этом случае для обеспечения метрологических требований необходимо проведение компьютерного моделирования и расчетов с учетом особенностей конкретного объекта, что затрудняет унификацию СНКВ для их последующего масштабирования.

Еще одной острой проблемой является необходимость выбора газоаналитического оборудования с учетом требований по импортозамещению и экономической целесообразности внедрения СНКВ. В рамках научных исследований в области создания СНКВ ТЭС в НИУ «МЭИ» была разработана методика выбора газоаналитического оборудования, учитывающая широкий перечень технических, экономических и метрологических требований к СНКВ. Данная методика была включена с Предварительный Национальный стандарт ПНСТ 187-2017[3], вступивший в силу в 2018 году. Необходимо отметить, что выбор оборудования значительно осложняется крайне ограниченным перечнем предложений газоаналитического оборудования, удовлетворяющего всем вышеперечисленным требованиям, от российских производителей.

Таким образом, в настоящее время сформирована достаточная нормативная база, учитывающая результаты многолетних научных исследований в области создания СНКВ энергетических объектов. Но для внедрения таких систем на всех энергетических объектах I категории необходимы исследования, направленные на совершенствование измерительного оборудования российского производства и изучение возможностей масштабирования пилотных проектов по созданию таких систем на другие энергетические объекты.

Список литературы

1. Предварительный национальный стандарт ПНСТ 187-2017 «Автоматические системы непрерывного контроля и учета выбросов вредных (загрязняющих) веществ тепловых электростанций в атмосферный воздух».

УДК 536.24: 533

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ И СОПРОТИВЛЕНИЯ ОРЕБРЕННЫХ ТРУБЧАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Королева М.Р.[1,2], Сабурова Е.А.[2], Чернова А.А.[2]

[1] Удмуртский Федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск
[2] Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова

e-mail: koroleva@udman.ru

Оребренные трубчатые элементы широко используются в различных энергетических установках, оснащенных терморегулирующим оборудованием конвективного типа [1,2]. Чаще всего такие устройства выполняются в виде трубных пучков или пакетов, которые отличаются высоким показателем теплопередачи, сопротивлением механическим воздействиям и нагрузкам, способностью выдерживать повышенное давление и резкие смены эксплуатационных условий. Схема компоновки таких пакетов зависит от характеристик теплообменных устройств [2]: достигаемой разности температур, необходимой степени турбулизации потока, величины гидродинамического сопротивления.

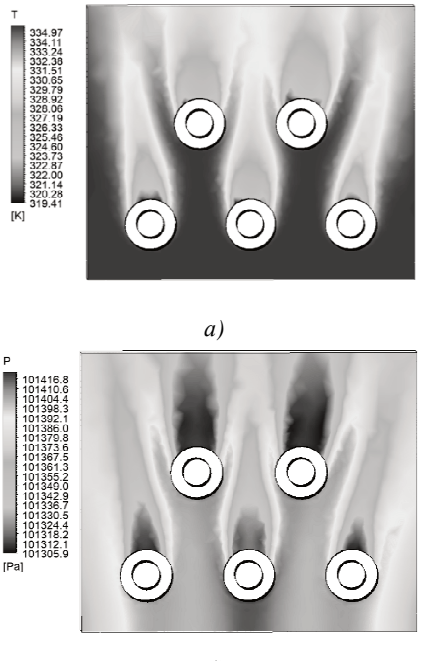
Улучшение характеристик терморегулирующего оборудования является актуальной задачей для энергетической промышленности. При проектировании новых и модернизации существующих теплообменных аппаратов следует учитывать оптимальное сочетание между ростом тепловой эффективности за счет увеличения скорости и турбулизации потока и увеличением гидродинамического сопротивления.

В работе проводится исследование эффективности охлаждения воздушного потока посредством оребренных трубчатых элементов, расположенных поперек движения потока. Проведены теплогидравлические расчеты одиночного элемента охлаждения и трубного пучка, для которых получены среднее падение температуры воздушного потока и потери давления.

Численное моделирование проводилось на основе модели вязкого сжимаемого теплопроводного газа с учетом турбулентности течения. Для замыкания осредненной по Фавру и Рейнольдсу системы уравнений сохранения применялась модель турбулентности Ментера SST [3]. Дискретизация расчетной области производилась с использованием призматических элементов (шестигранников), общее количество которых не превышало 6 млн. элементов.

Результаты моделирования процесса охлаждения воздуха на основе пяти трубчатых элементов показаны на рис.1. Приведено распределение полной температуры и полного давления в поперечной плоскости течения. Скорость набегающего воздушного потока составляла 8,5 м/с. В данном случае падение температуры воздушного потока составило в среднем ~5,7 градусов, при потерях давления ~37 Па.

Для верификации данных расчеты параллельно проводились с использованием различных вычислительных алгоритмов и схем разного порядка точности. Расхождение полученных данных по давлению не превышало 8%, по температуре – 3%.



а)

б)

Рис.1 – Поля полных температуры (а) и давления (б).

Показано, что для охлаждения объема газа 6,75 м^3 в исследуемых допустимых температурных диапазонах необходимо и достаточно использовать два ряда оребренных трубок длиной 1,5 м, расположенных в шахматном порядке, общим числом 10-12 элементов, при этом падение давления между не превышает 100 Па.

Анализ результатов проведенных численных исследований позволяет предложить универсальную инженерную методику оценки теплогидравлических параметров системы охлаждения на основе трубчатых элементов данного типа конструкций.

Список литературы

1. Федоров В.А., Мильман О.О., Ананьев П.А., Птахин А.В., Жинов А.А., Карышев А.К., Шевелев Д.В. Результаты экспериментально-расчетных исследований воздушного потока в цирктрассах воздушных конденсаторов паротурбинных установок // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 5. С. 87–105.
2. Xing Xuea, Xianming Fenga, Junmin Wanga, Fang Liu. Modeling and Simulation of an Air-cooling Condenser under Transient Conditions // Procedia Engineering. 2012. V. 31. P. 817–822.
3. Menter F.R., Kuntz M., Langtry R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model // Proc. 4th. Int. Symp. on Turbulence. Heat and Mass Transfer. Begell House. 2003. P. 625–632.

Работа поддержана ИжГТУ имени М.Т. Калашникова (грант № ЧАА/20-30-07)

УДК 551.465

ВИХРЕ-ВОЛНОВОЙ РЕЖИМ ГЕОСТРОФИЧЕСКОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Коротаев Г.К.

ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН», Севастополь

e-mail: gkorotaev@gmail.com

Пятьдесят лет назад советскими океанологами в эксперименте «Полигон-70» были обнаружены синоптические вихри открытого океана. Это открытие оказало значительное влияние на развитие океанологии, поскольку показало, что текущее состояние Мирового океана существенно отличается от климатического среднего. В частности, оно стимулировало организацию непрерывных наблюдений океана в рамках программы Global Ocean Observing System (GOOS). Существенным компонентом оперативной наблюдательной системы является спутниковая альтиметрия, которая позволяет наблюдать синоптические вихри во всем Мировом океане. Спутниковые альтиметрические наблюдения, накопленные с начала 90-х годов прошлого века, показывают повсеместное существование в океане долгоживущих вихревых структур с радиусом от нескольких десятков до первой сотни километров. В соответствии с современными представлениями вихревая активность в океане описывается как геострофическая турбулентность, для которой характерен перенос энергии от меньших масштабов к большим. Такому спектральному потоку отвечает пространственный спектр кинетической энергии, пропорциональный волновому числу в степени -3. Как правило при рассмотрении геострофической турбулентности не учитывается так называемый бета-эффект, отражающий изменение с широтой проекции вектора вращения Земли. Такой подход является обоснованным, когда вихри имеют высокую интенсивность и плотную упаковку в пространстве. Однако, как показали численные эксперименты, выполненные в середине 80-х годов, перенос энергии к большим масштабам осуществляется посредством укрупнения вихрей за счет их слияния. Соответственно с течением времени число вихрей уменьшается, и они располагаются на довольно значительном расстоянии друг от друга. Вне вихрей движение жидкости при этом соответствует турбулентному режиму. Однако при учете бета-эффекта движущийся вихрь излучает планетарные волны Россби. Поэтому на определенном этапе эволюции геострофической турбулентности пространство между относительно редко расположенными вихрями заполняется волнами Россби. Как оказывается вихри не только излучают энергию, но и могут ее получать от волн Россби при выполнении определенных условий. Таким образом при учете бета – эффекта формируется вихреволновой режим геострофической турбулентности. Обобщенный анализ спутниковых альтиметрических наблюдений показывает, что вдали от интенсивных струйных течений долгоживущие синоптические вихри располагаются относительно редко. Пространство между ними заполнено быстро меняющимися структурами с небольшой амплитудой, которые естественно отождествлять с волнами Россби. Такое предположение подтверждается результатами анализа наблюдений на полигоне программы «Полимоде», где в течение года проводились регулярные гидрологические наблюдения. Таким образом, спутниковые альтиметрические наблюдения позволяют предположить, что на основной части океана в умеренных широтах наблюдается вихре – волновой режим геострофической турбулентности. В докладе обсуждаются механизмы формирования и характеристики вихре – волнового режима. В частности, отмечается, что косвенным подтверждением развития вихре – волнового режима геострофической турбулентности в океане являются выявленные при обработке наблюдений с ИСЗ разные тенденции смещения вдоль меридиана циклонических и антициклоничесих вихрей.

Работа выполнена в ФГБУН ФИЦ «Морской Гидрофизический институт РАН» при поддержке Российского научного фонда, грант № 17-77-30001

УДК 536.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР ПО ПОВЕРХНОСТИ ОБЪЕКТА ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НАГРЕВА ГАЗОВЫМ ИНФРАКРАСНЫМ ИЗЛУЧАТЕЛЕМ

Кузнецов Г.В., Максимов В.И., Нагорнова Т.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

e-mail: elf@tpu.ru

Снижение потребления энергии, повышение энергоэффективности зданий и создание теплового комфорта в них становятся все более актуальными задачами в современном мире [1]. Одними из эффективных систем обеспечения теплового режима в зданиях и сооружениях в последние годы всё чаще используются газовые инфракрасные излучатели (ГИИ) [2]. Но для их широкого внедрения нет объективного анализа тепловых режимов таких объектов для прогнозирования основных характеристик теплового комфорта в них. Целью настоящей работы является установление основных закономерностей распределения температур на поверхностях типичного объекта теплоснабжения для характерных условий работы, интервалов времени и подводимых в рабочую зону тепловых потоков от газового инфракрасного излучателя.

Экспериментальные исследования проводились в зоне воздействия одного газового инфракрасного излучателя мощностью 5 кВт, расположенного в крупногабаритном помещении. Принципиальная схема области измерений приведена на рис. 1. Модуль объекта теплоснабжения был покрыт тканью. Конфигурация покрытия в целом соответствовала форме типичной рабочей одежды.

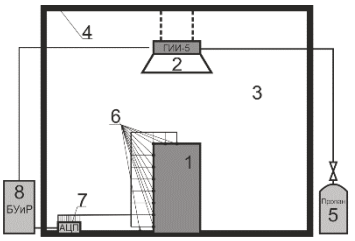


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки: (1) объект теплоснабжения; (2) газовый инфракрасный излучатель; (3) воздушная среда; (4) ограждающая конструкция; (5) баллон с пропаном; (6) термопары; (7) аналого-цифровой преобразователь; (8) блок управления и регистрации.

Термопары вводились в переплетение нитей ткани и закреплялись таким образом, чтобы между спаем и внешней средой был один нитяной слой толщиной не более 0,2 мм. В этом случае термопары регистрировали фактическую температуру приповерхностного слоя ткани на глубине 200 мкм.

Результаты измерений температур приведены на рис. 2 Хорошо видно, что процесс формирования температурного поля объекта заканчивается через 2000-2500 секунд после начала нагрева. Выход на стационар для термопар, расположенных на вертикальных поверхностях объекта и поверхности пола, заканчивается несколько раньше. На основании анализа полученных в экспериментах результатов можно выделить ряд закономерностей исследуемых процессов.

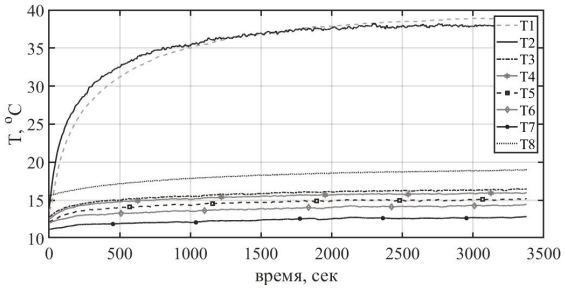


Рис. 2. Изменение температуры на поверхности исследуемого объекта и пола с течением времени (материал №3, ткань 100% хлопок, цвет синий, T1–T8 номера термопар в соотв. с табл. 1).

Таблица 1. Расположение термопар на объекте теплоснабжения.

Обозначение	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
Расстояние от пола, мм	155	145	125	105	95	75	55	0
Угол падения теплового потока	90	90	0	0	0	0	0	90

Установлено, что температуры в точках пола, расположенных в зоне действия ГИИ, существенно (до 6 °C) превышают температуры поверхности объекта (и воздуха) на высоте до 1,8 м, что говорит о влиянии естественной конвекции при формировании поля температур. Этот вывод подтверждают и изменения температур поверхности ткани, покрывающей объект, на горизонтальном участке (рис. 2, температуры T1, T2). Проведено сравнение значений температур на вертикальной и горизонтальной поверхностях объекта. Хорошо видно, что разница значений этой характеристики процесса составляет до 20 °C. Последнее иллюстрирует значимость ориентации поверхности объекта теплоснабжения относительно потока излучения, с одной стороны, и масштабы влияния термогравитационной конвекции воздуха на тепловой режим объекта. С другой можно сделать вывод, что объект теплоснабжения в зоне влияния ГИИ в любых условиях эксплуатации будет нагрет до температур, соответствующих регламентным.

Список литературы

1. De Boeck L., Verbeke S., Audenaert A., De Mesmaeker L. Improving the energy performance of residential buildings: A literature review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. V. 52. P. 960–975.
2. Rhee K.-N., Olesen B.W., Kim K.W., Ten questions about radiant heating and cooling systems // Building and Environment. 2017. V. 112. P. 367–381.

Работа поддержана РНФ (грант № 20-19-00226)

УДК 662.739

ВЛИЯНИЕ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ПРИ СОВМЕСТНОМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ПИРОЛИЗЕ С УГЛЯМИ

Кузнецов Г.В., Чередник И.В., Толокольников А.А., Янковский С.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

e-mail: Jankovsky@tpu.ru

Сжигание углей в энергетических котлах большой и малой энергетики приводит к загрязнению атмосферы земли антропогенными оксидами [1]. Даже применение современных фильтрующих устройств для очистки дымовых газов не приводит к кардинальному улучшению экосистемы в мире. Решение этой экологической проблемы является важной и актуальной задачей энергетиков многих развитых государств (Китай, США, Индия, Австралия) [1]. Основными, образующимися при сжигании каменных углей антропогенными оксидами являются оксиды серы, азота и углерода [2]. В связи с этим задача по совершенствованию технологий сжигания топлив на угольных электростанциях с целью снижения массы выбрасываемых в атмосферу с дымовыми газами загрязняющих веществ, образующихся при сжигании углей в топках энергетических котлов, является одной из важных на сегодняшний день [2].

Целью настоящей работы является экспериментальное установление закономерностей образования солей двух основных металлов (кальция и алюминия), присутствующих в минеральной части углей марок Т, Д, 3Б и в биомассе (кальция) в результате полного завершения процессов пиролиза обеих компонент смесей различных видов углей с мелкодисперсной древесиной.

Разработана методика экспериментального исследования процессов термического разложения смеси углей марки Д, Т, 3Б и мелкодисперсных сосновых отходов лесопиления. Навеска топливной смеси массой 15г. ±0,1г. помещалась в тигель, расположенный в продуваемой инертным газом специализированной камере. Нагрев тигля с навеской осуществлялся в диапазоне температур от 400 ˚С до 800 ˚С. Непрерывно в период проведения эксперимента проводился газовый анализ с целью контроля отсутствия кислорода. Анализ элементного состава зольных остатков всех исследовавшихся топливных смесей на основе углей марок Д, Т, 3Б и сосновых опилок проводился с применением прибора элементного анализа X-Supreme 8000 (анализатор химического состава).

Анализ проведен для установления изменений содержания сульфатов кальция и алюминия в золе смесей углей марок Д, Т, 3Б и древесины с ростом доли последней компоненты (древесины) в смеси каждого угля до 50 %. Результаты экспериментальных исследований приведены на рисунках 1,2.

Анализ рис. 1 (а) позволяет сделать вывод, что увеличение концентрации древесной компоненты до 50 % в смесевых топливах на основе углей марок Т, Д, 3Б приводит к существенному (на 54,8 %, например, для угля марки Т) увеличению доли сульфата кальция в золе при температуре 800°С. Прирост концентрации сульфата алюминия рис.1 (б) зарегистрирован во всем диапазоне исследуемых температур, а при Т=800°С составил около 46,4 % для угля марки 3Б, например.

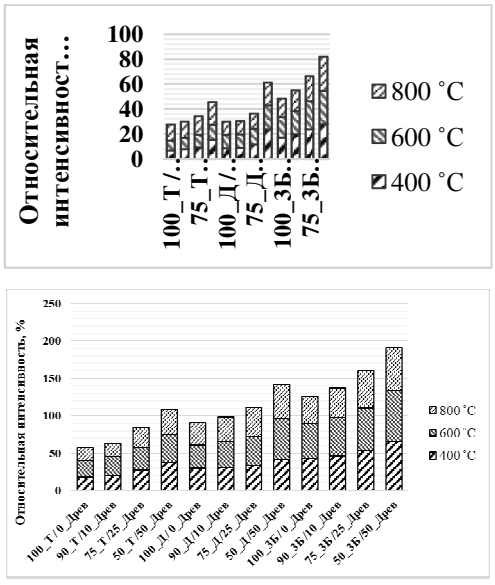


Рис. 1. Изменение содержания сульфата кальция (а) и алюминия (б) с ростом доли древесины в золе углей Т, Д, 3Б, древесины и двухкомпонентных смесей на основе углей Т, Д, 3Б и древесины при пиролизе в инертной среде.

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что при совместном термическом разложении двухкомпонентных топливных смесей на основе углей марок Т, Д, 3Б и древесины при пиролизе в инертной среде происходит увеличение концентрации сульфатов кальция и алюминия в золе смесей с увеличением доли древесной компоненты в них по отношению к однородному углю.

Список литературы

1. Nobre C., Alves O., Longo A., Vilarinho C., Gonçalves M. // Bioresour. Technol. 2019. V. 285. P. 121325.
2. Kuznetsov, G.V., Yankovskii, S.A. // Thermal Engineering. 2019. V. 66(2). P. 133–137.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ грант № 18-29-24099/18

УДК 504.35

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ CFD КОДА SIGMAFLOW ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЕТРОВОЙ СРЕДЫ ВОКРУГ ГРУППЫ ЗДАНИЙ

Мешкова В.Д.[1], Дектерев А.А.[1,2], Литвинцев К.Ю.[2]

[1] Сибирский Федеральный университет, Красноярск
[2] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

e-mail: Redel-VD@yandex.ru

Работа посвящена анализу возможности CFD кода SIGMAFLOW прогнозировать ветровой режим на уровне пешеходной комфортности на примере модельной задачи.

В качестве математической модели для описания процесса движения турбулентных потоков вокруг группы зданий рассматривалась пространственная стационарная модель несжимаемого газа. Для замыкания уравнений при турбулентном режиме течения использовалась модель турбулентности k-ω SST [1]. Дискретизация уравнений выполнена методом контрольного объема. Для численного согласования полей скорости и давления применялась процедура SIMPLE-C [2]. Для расчета характеристик течения вблизи стенок используются пристеночные функции.

Проведена верификация предложенной модели путем сравнения с экспериментальными данными, полученными в Архитектурном институте Японии [3]. Рассматривалась группа зданий, состоящая из малоэтажных домов (площадь 40 м и высоту 10 м) и высокого здания в центре (площадь 25 м и высоту 100 м) (рис.1). Данная конфигурация приближена к реальной застройке. Между зданиями условно расположены дороги шириной 10, 20 и 30 м (рис.1). Контрольные точки наблюдения расположены вокруг высотного здания.

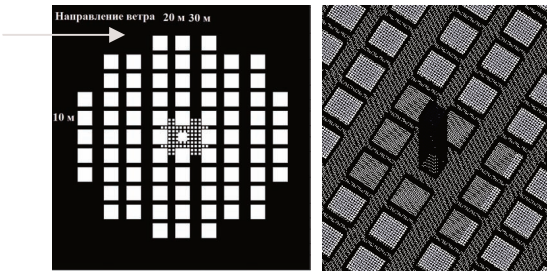


Рис. 1. Постановка задачи.

Для сравненного анализа было использовано пять вариантов структурно-многоблочных расчетных сеток с различной степенью детализации (табл.1). Вертикальный профиль средней скорости ветра задавался по логарифмическому закону [3].

Таблица. 1 Варианты сеток.

Вариант	Сетка, ячейки
A	1 020 000
B	1 340 000
C	4 480 000
D	4 830 000
E	5 260 000

Сравнение осуществлялось по значениям скорости. Варианты сеток A, B и D имели сгущение в области расположения контрольных точек. Результаты моделирования показали, что используемой детализации недостаточно для полного повторения течения. На входе к высотному зданию значение скоростей занижены в отличие от результата эксперимента, а на выходе имеют большой разброс (рис.3). Поэтому, были выполнены расчеты еще на двух сетках C и E с большим сгущением по потоку вдоль узких улиц от входа до конца области с контрольными точеками. Результаты расчета на этих сетках лучше коррелируют с результатами экспериментов и дают хорошее предсказание поле скорости (рис.2).



Рис. 2. Сравнение результатов CFD расчета с экспериментальными данными.

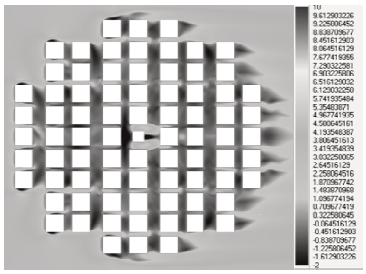


Рис. 3. Поле скорости в горизонтальном сечении на высоте 2 м, м/с.

На рис. 3 видно, что из-за плотного расположения малоэтажных домов образуются зоны рециркуляции с низкими скоростями ветра. За многоэтажным зданием образуется сводообразующий вихрь (рис.2).

Результаты моделирования показали, что CFD код SIGMAFLOW и предложенная математическая модель позволяют корректно прогнозировать ветровую среду вокруг группы зданий.

Список литературы

1. Menter. F.R. Zonal two equation k-ω turbulence models for aerodynamic flows // AIAA Paper. 1993. No. №93–2906. P. 21.
2. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М. Энергоатомиздат. 1984.
3. Kato M., Launder B. E. The modelling of turbulent flow around stationary and vibrating square cylinders // Ninth Symposium on «Turbulent Shear Flows». Kyoto, Japand 1993. P. 10–14.

Работа поддержана РФФИ (грант № 19-31-90096)

УДК 551.465

ОЦЕНКИ ВОДООБМЕНА ЧЕРЕЗ КЕРЧЕНСКИЙ ПРОЛИВ НА ОСНОВЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ В ЧЕРНОМ МОРЕ

Мизюк А.И., Лишаев П.Н., Коротаев Г.К., Пузина О.С.

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь

e-mail: artem.mizyuk@mhi-ras.ru

Для Азовского моря характерна значительная пространственная неоднородность солености. В последние годы наблюдается сокращение речного стока до исторических минимумов. Вместе с аномальной адвекцией черноморских вод это привело к повышению общей солености в бассейне. Это демонстрируют и измерения в Азовском море. Однако, они выполняются главным образом на прибрежных станциях, что не позволяет исследовать характер водообмена вообще и оценивать величину втока более соленых черноморских вод в частности. В работе предлагается методика оценки водообмена через Керченский пролив на основе вихреразрешающего численного моделирования и измерений температуры и солености, выполненных в бассейне Черного моря.

Численное моделирование гидрофизических полей в бассейнах в настоящей работе выполняется на основе модельного комплекса NEMO [1]. Расчетный домен представляет собой квазирегулярную сетку, покрывающую бассейны Черного, Азовского и Мраморного морей с шагом сетки $^1/_{24}° \times {}^1/_{17}°$ в меридиональном и зональном направлениях соответственно, что приблизительно равно 4,6 км. Методика проведения экспериментов описана в работе [2]. Однако, важным отличием работы является методика коррекции модельного решения данными наблюдений температуры и солености (т. н. усвоение данных наблюдений. Для этого используется упрощенная версия процедуры из работы [3].

Для задания граничных условий на поверхности в численных экспериментах используются поля температуры и влажности воздуха на уровне 2 м, компонент горизонтальной скорости ветра на 10 м, потоки нисходящего длинноволнового и коротковолнового излучения, осадки в жидкой и твердой фазах. Для уточнения баланса соли в бассейне Азовского моря учитываются среднемесячные значения стока рек Дон и Кубань.

В работе представлены результаты двух численных экспериментов. В первом эксперименте выполняется прогностический расчет, а во втором – осуществлялась коррекция численного решения уравнений переноса-диффузии температуры и солености. Это сделано посредством включения в правые части конечно-разностных аналогов уравнений релаксационных членов вида «$-\gamma\,(T - T_0)$» для температуры и «$-\gamma\,(S - S_0)$» для солености, где T_0 и S_0 – поля температуры и солености, построенные по наблюдениям, γ – некоторый параметр релаксации. Предполагается, что скорректировав таким образом величины термохалинных параметров в бассейне Черного моря, мы получим более адекватные значения потока тепла и соли между бассейнами.

Для поверки результатов нами были использованы данные с прибрежных гидрометеостанций (ГМС). Поведение солености по результатам численного моделирования качественно воспроизводит рост солености в бассейне Азовского моря. Это подтверждает сопоставление с имеющимися данными измерений с ГМС. Отметим, что динамика в прибрежной области при выбранном разрешении не может быть адекватно воспроизведена. В целом, по солености в эксперименте с коррекцией количественное согласование по станциям оказалось несколько выше, чем в прогностическом расчете. Аналогичное сопоставление выполнено для измерений температуры. Качественно и количественно поведение температуры по результатам численного моделирования хорошо согласуется с наблюдениями с ГМС. Летние максимумы температуры воспроизводятся моделью во все годы. Длительность периода зимнего выхолаживания также соответствует измерениям. Максимальные СКО «модель минус наблюдения» наблюдаются на станциях Тамань и Очаковская коса. Анализируется межгодовая и сезонная изменчивость объемного расхода, а также потока соли через Керченский пролив.

Отметим, что пространственное разрешение текущей версии конфигурации численной модели недостаточно для воспроизведения мелкомасштабной динамики в мелководном бассейне. Однако, результаты работы планируется использовать в дальнейшем при построении системы прогнозов в бассейне моря.

Список литературы

1. Madec G. NEMO reference manual, ocean dynamics component // ISSN 1288-1619, Note du pôle de modélisation IPSL № 27. France. January 2016.
2. Мизюк А.И., Коротаев Г.К., Григорьев А.В., Пузина О.С., Лишаев П.Н. Долгопериодная изменчивость термохалинных характеристик Азовского моря на основе численной вихреразрешающей модели // Морской гидрофизический журнал. 2019. № 5. С. 496–510.
3. Лишаев П.Н., Кныш В.В., Коротаев Г.К. Восстановление температуры и солености в верхнем слое Черного моря по данным псевдоизмерений на нижележащих горизонтах // Морской гидрофизический журнал. 2019. № 2. С. 114–133.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 17-77-3001)

УДК 621.175

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СЕКЦИЙ ВАКУУМНОГО КОНДЕНСАТОРА В УСЛОВИЯХ НЕРАВНОМЕРНОГО ТЕПЛОСЬЕМА

Мильман О.О., Картуесова А.Ю., Птахин А.В., Крылов В.С.

ЗАО НПВП «Турбокон», Калуга

e-mail: turbocon@kaluga.ru

Повышение эффективности работы конденсационных устройств паровых турбин с наиболее полным использованием теплоты отработавшего пара для получения электрической энергии при ограниченных объемах охлаждающей воды является одним из основных резервов на теплоэлектростанциях.

Проектирование вакуумных конденсаторов паровых турбин осуществляется на расчетных условиях, когда все части конденсатора охлаждаются одинаково, расходы охлаждающей воды (воздуха – для воздушных конденсаторов) и присосы воздуха также одинаковы. Отклонение работы от расчетного режима работы возникает по ряду причин, например, неравномерного охлаждения теплообменной поверхности конденсатора вследствие ее загрязнения, либо неисправности вентилятора (в случае воздушных конденсаторов), наличия локальных присосов воздуха и пр. [1, 2].

Целью данной работы являлось проведение расчётно-экспериментального исследования совместной работы конденсатора и газоудаляющего устройства в условиях неравномерного теплосъема в том числе с разработанным техническим решением по повышению эффективности – дроссельными вставками в линию эжектирования [3].

Была разработана методика расчета оптимального диаметра дросселя для многосекционных конденсаторов с заданным неравномерным охлаждением из n числа секций (см. рис. 1). В формулах (1) – (4) показаны основные расчетные величины.

$$\Delta P_{\text{тр}} = K' \frac{\rho w_0^2}{2} C_x \left[\left(\frac{w_1}{w_0} \right)^2 - 1 \right] \quad (1)$$

$$\Delta P_{\text{др}} = L' \frac{\rho w_0^2}{2} \frac{x_1^2}{\left(\bar{n}_1 + \bar{n}_2 M \right)^2} \quad (2)$$

$$K' = z\lambda \frac{l}{d_{\text{г}}} \quad (3)$$

$$L' = \xi n_{\text{тр}}^2 \left(\frac{d_{\text{тр}}}{d_{\text{др}}} \right)^4 \quad (4)$$

где $\Delta P_{\text{тр}}$ – потери давления в трубах конденсатора, Па; $\Delta P_{\text{др}}$ – потери давления на дросселе; n_1 – число секций с расчетным охлаждением; n_2 – число секций с нерасчетным охлаждением; w_0 – скорость пара на входе в конденсатор; z – количество ходов пара; $d_{\text{др}}$ – диаметр дросселя; x_1 – паросодержание на выходе из модуля при равномерном охлаждении; x_2 – паросодержание на выходе из модуля при неравномерном охлаждении; l – длина теплообменных труб; $d_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр теплообменных труб; $\xi_{\text{др}}$ – сопротивление дросселя; $n_{\text{тр}}$ – количество теплообменных труб в модуле; λ – коэффициент трения (с учетом шероховатости).

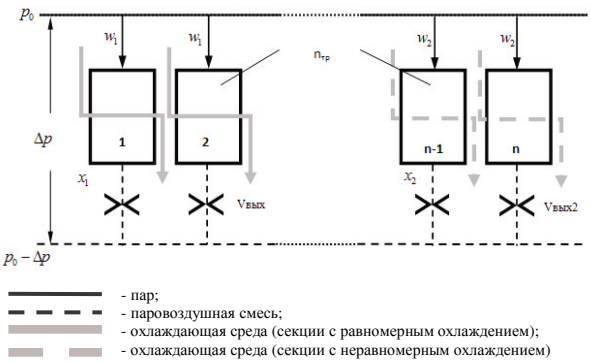


Рис. 1. Схема ВКУ из N числа секций.

Выводы

1. Проведено расчетно-экспериментальное исследование режимов работы макета конденсатора при неравномерном охлаждении части теплообменной поверхности и наличия присосов воздуха в пар.
2. Предложена методика расчета оптимального диаметра дросселя для многосекционных конденсаторов.
3. Результаты, полученные при выполнении данной работы, вносят значительный вклад в понимание процессов работы конденсационных установок на переменных режимах и способах борьбы со снижением тепловой эффективности вследствие возникающей неравномерности охлаждения и локальных присосов воздуха.

Список литературы

1. Мильман О.О., Федоров В.А. Воздушно-конденсационные установки. М.: Изд./ МЭИ. 2002. 208 с.
2. Шкловер Г.Г., Мильман О.О. Исследование и расчет конденсационных устройств паровых турбин. М.: Энергоатомиздат. 1985. 240 с.
3. Milman O.O., Kartuesova A.Yu., Yankov G.G., Ptakhin A.V., Krylov V.S., Korlyakova M.O. Investigation of parallel operation of vacuum condenser sections with nonuniform cooling//Thermal Engineering. 2019. V. 66. No. 2. P. 77–83.

УДК 621.184.44

ПРИБЛИЖЕННАЯ ОЦЕНКА ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КОНТАКТА РЕБРО – СТЕНКА ДЛЯ КРУГЛЫХ ТРУБ С ЗАПРЕССОВАННЫМ ОРЕБРЕНИЕМ

Мильман О.О.[1,2], Кондратьев А.В.[1,2,3], Птахин А.В.[1,2,3], Крылов В.С.[1,2]

[1] ЗАО НПВП «Турбокон», Калуга
[2] Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского
[3] Московский государственный университет им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал

e-mail: turbocon@kaluga.ru

В процессе разработки конструкций теплообменников, состоящих из различных типов оребрённых труб, влияние на точность расчётов оказывает корректность оценки величины термического сопротивления оребрения. Однако в зависимости от типа оребрения (навивка, навивка с насечкой, запрессовка, сварка, насадка и т.д.), величина термического сопротивления узла ребро – стенка может варьироваться в широких пределах. Исследования [1] позволяют не столько учесть термическое сопротивление этой зоны, сколько увидеть совокупность факторов, влияющих на величину этого сопротивления:

- качество обработки поверхности;
- теплопроводность материалов труб и оребрения;
- механические свойства материалов;
- способ крепления оребрения;
- удельное давление (напряженное состояние) контактирующих материалов.

Кроме того, теплообменные аппараты, набранные из теплообменных труб некруглого сечения, не могут быть корректно рассчитаны из-за отсутствия в технической литературе достоверных методик расчёта термического сопротивления.

Для экспериментального определения величины термического сопротивления ребро – стенка различных образцов теплообменных поверхностей был создан экспериментальный стенд и разработана методика обработки результатов экспериментов.

Было выполнено сопоставление термического сопротивления узла ребро – стенка для различных типов теплообменных поверхностей, а также сопоставление полученных данных с результатами промышленных испытаний и проектными показателями теплообменников.

Описание стенда [2] Расход воздуха, подаваемого в стенд, производится при помощи сопла Вентури. Воздух забирается из помещения, нагревается 4 рядами трубчатых электронагревателей, затем движется через межтрубное пространство исследуемого теплообменного модуля и покидает воздушный тракт. Вода из бака хранения подаётся насосом внутрь труб модуля теплообменной поверхности, состоящего из круглых труб с запрессованным оребрением (см. рис. 1), а затем сливается в канализацию. Измерение температуры и давления теплоносителей выполняется перед модулем исследуемой теплообменной поверхности и на выходе из него.

После проведения двух серий измерений – с переменными расходами воды и воздуха – по специально разработанной методике оценивалась величина термического сопротивления узла ребро – стенка.

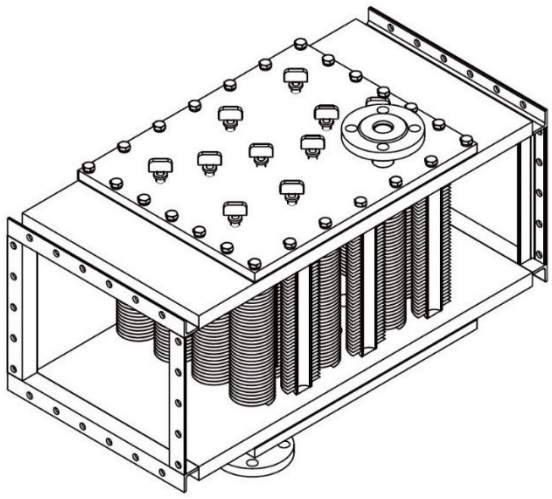


Рис. 1. Внешний вид модуля теплообменной поверхности из круглых труб с запрессованным оребрением.

Выводы

1. Создан стенд для экспериментальных исследований процессов теплообмена в теплообменных поверхностях различной конфигурации.
2. Проведены лабораторные и промышленные экспериментальные исследования модулей теплообменных поверхностей.
3. Разработана методика оценки величины контактного термического сопротивления узла ребро–стенка для теплообменных поверхностей различной конфигурации.
4. По результатам экспериментальных исследований были получены теплогидравлические характеристики теплообменной поверхности, состоящей из круглых труб с запрессованным оребрением и произведена оценка величины контактного термического сопротивления узла ребро – стенка.
5. Сопоставлены характеристики различных типов теплообменных поверхностей.

Список литературы

1. Попов В.М. Теплообмен в зоне контакта разъёмных и неразъёмных соединений. М.: Энергия. 1971. 216 с.
2. Milman O.O.,Yankov G.G., Kondratev A.V., Ptakhin A.V., Krylov V.S., Korlyakova E.J., Zhilin A.E. Approximate estimation of the thermal resistance of the terms in the process of heat transfer through the finned wall // Journal of Physics: Conference Series. 2017. V. 891. P. 012137.

Работа поддержана РНФ (грант № 17-19-01604)

УДК 621.039.526

РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ АРМАТУРЫ ДЛЯ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК БН

Низамутдинов В.Р., Пахолков В.В., Прокопцов И.С., Рогожкин С.А.

АО «ОКБМ им. И.И. Африкантова», Нижний Новгород

e-mail: stenat2007@yandex.ru

Одной из особенностей реакторной установки на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (РУ БН), разрабатываемой в настоящее время в АО «ОКБМ Африкантов», является полное интегрирование оборудования, основных и вспомогательных систем первого контура в корпусе реактора, включая систему контроля качества и очистки натрия.

Обеспечение чистоты теплоносителя является одной из основных задач технологии энергетических установок, охлаждаемых натрием. В качестве средств очистки натрия от примесей наибольшее распространение получили холодные ловушки (ХЛ), которые представляют собой тепломассообменные устройства, служащие для непрерывной очистки циркулирующего через них натрия. Принцип действия ХЛ основан на уменьшении растворимости основных примесей при снижении температуры натрия и их осаждение на фильтрах [1, 2].

Размещение ХЛ в корпусе реактора имеет ряд сложностей, которые необходимо учитывать в процессе проектирования. Одна из них – это обеспечить надежность и работоспособность регулирующей арматуры ХЛ. К регулирующей арматуре относятся устройство дросселирующее (УД) и устройство регулирующее (УР), предназначенные для обеспечения распределения необходимых расходов теплоносителя в ХЛ во всех режимах нормальной эксплуатации РУ. УД состоит из 20 перегородок со сточенными сегментами, при прохождении которых происходит сужение и расширение потока теплоносителя. УР представляет собой конструкцию, которая в зависимости от положения наконечника позволяет изменять площадь проходного сечения (см. рис.1).

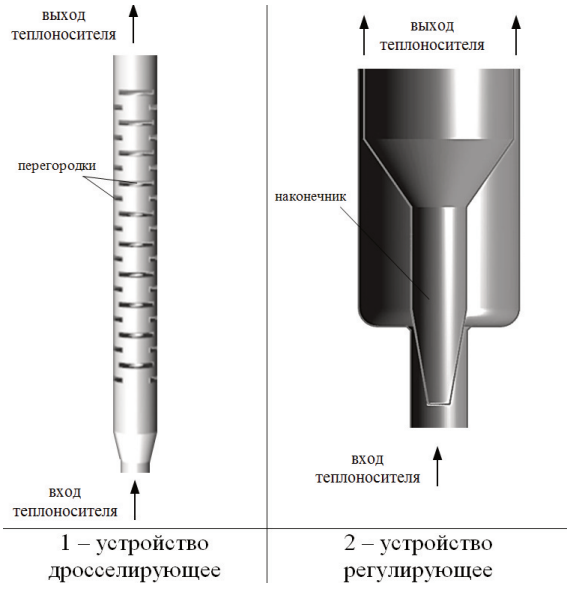


Рис. 1. Расчётная модель регулирующей арматуры.

В результате исследования получены:

– зависимости гидравлического сопротивления УД от высоты сегмента;

– зависимости гидравлического сопротивления УР от положения наконечника.

Оптимизация размеров арматуры для обеспечения необходимых гидравлических характеристик требует значительного объема экспериментальных исследований. Для уменьшения количества доработок конструкции при экспериментальном исследовании гидравлики арматуры было принято решение использовать численное моделирование с применением CFD-кодов. Численное моделирование также позволяет оценить неравномерность поля скорости в месте установки расходомера в УР и исследовать чувствительность гидравлического сопротивления УД к изменениям геометрии в пределах допуска.

Численное моделирование проводилось с использованием отечественного верифицированного программного средства FlowVision с применением RANS подхода. Для вычисления коэффициента гидравлического сопротивления проводилась серия расчетов по определению перепада давления в зависимости от расхода теплоносителя. Задача решалась в трёхмерной постановке. Конечно-элементные модели содержат до 7,7 млн. элементов и построены с локальными сгущениями.

Экспериментальное исследование выполнялось на специально спроектированном и изготовленном для этой цели стенде. С целью исследования гидродинамических характеристик арматуры были изготовлены их полномасштабные модели, содержащие все основные элементы проточных частей арматуры. В качестве рабочей среды использовалась вода при температуре не более 80 °С.

Сравнительный анализ результатов расчётов и экспериментальных данных показывает, что современные CFD-коды, такие как FlowVision, позволяют уменьшить количество доработок испытываемых моделей проектируемых сложных гидравлических устройств.

Список литературы

1. Berikbosinov V.T., Gusev D.V., Komarov A.E., Rogozhkin S.A., Rukhlin S.V., Shepelev S.F., Shumsky A.A. Development of the built-in primary sodium purification system for the advanced BN-1200 reactor plant // International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles – FR17 / IAEA-CN245-404.
2. Прокопцов И.С., Рогожкин С.А., Фадеев И.Д. Моделирование теплогидравлических процессов во встроенной холодной ловушке перспективного реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем / Материалы XXI Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам. 24-31 мая, 2019. Алушта.

УДК 66.045.122, 001.891.573

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В АДДИТИВНЫХ КОЖУХОТРУБНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКАХ

Пугачук А.С.[1,2], Фоминых Н.К.[3], Гаврилова Ю.А.[3]

[1] Объединенный институт высоких температур РАН, Москва
[2] Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва
[3] ПАО «НПО «Алмаз»

e-mail: pugachukalexandr@mail.ru

Стремительное развитие технологий аддитивного производства позволяет изменить подходы к проектированию теплообменных аппаратов. На замену сборных конструкций, состоящих из пластин или трубок, разделяющих теплообменные среды, приходят монолитные выращенные послойно детали, которые могут быть оптимизированы для достижения максимальной эффективности передачи тепла и приемлемых гидравлических характеристик. Такие теплообменники обладают сложной геометрической формой и изготавливаются с помощью аддитивных технологий, например лазерного спекания, которые имеют некоторые ограничения. Толщина стенок при этом должна быть не менее 0,3 мм, а угол раскрытия печатаемой поверхности от нормали к основанию не более 45°.

Обширным направлением применения теплообменников является распределенная энергетика. Тренды развития этого направления указывают на то, что одним из перспективных инструментов снабжения электростанций энергией являются микротурбинные установки. Для повышения коэффициента полезного действия микротурбин проводится улучшение теплогидравлических показателей теплообменников, так как от степени рекуперации тепла и гидравлических потерь в значительной мере зависит эффективность работы энергетической установки. Увеличение теплогидравлических показателей (повышение площади поверхности теплообмена с уменьшением гидравлического сопротивления), а также снижение габаритов теплообменников, благодаря наиболее полному использованию пространства, стало возможным ввиду применения современных подходов к изготовлению – аддитивных технологий. Теплообменники, изготовленные методом селективного лазерного плавления (аддитивные теплообменники), активно начали использовать в различных промышленных производствах. Обзор научных публикаций по данной тематике [1,2] показал, что за рубежом ведутся активные исследования с целью создания наиболее эффективной конфигурации теплообменника, трехмерной структуры, позволяющей оптимально использовать заданное пространство. В рассмотренных научных исследованиях представлено множество видов геометрических поверхностей, некоторые расчетные исследования для сравнения теплогидравлических показателей, однако способы получения этих поверхностей и параметры эффективности их применения в готовых установках остаются закрытой информацией.

В рамках разработки микрогазотурбинного двигателя рассматривается ряд новых проточных частей (конфигураций) аддитивного теплообменника. Целью научного исследования является разработка математических моделей и проведение расчетных исследований течения теплоносителей и теплообмена в различных конфигурациях элементов теплообменников для микротурбин с целью определения их тепловых и гидравлических характеристик.

Кожухотрубные теплообменники наиболее рационально использовать с точки зрения ограничений, предъявляемых аддитивными технологиями послойной металлической печати. В качестве единичного теплопередающего элемента теплообменника рассматривается сегмент с трубкой. Рассматриваемые конфигурации трубок имеют как оребренные поверхности, так и нетривиальную форму сечения, а также сложную пространственную форму.

Разработаны геометрические трехмерные модели нескольких элементов теплообменников (с внутренним, внешним оребрением – 3 и 6 рядов рёбер, лепестковые спиралевидные двух типоразмеров) и проведено математическое моделирование течения теплоносителей в их проточных частях с учетом теплообмена через стенку, разделяющую теплоносители.

Сравнение данных показало, что лепестковая форма элемента позволяет интенсифицировать теплообмен (по мощности теплоотдачи сопоставима с 3-рёберной трубкой), и один из типоразмеров имеет меньшее гидравлическое сопротивление по сравнению с 6-реберными трубками (однако уступает 3-реберным). При этом выявлено, что изменение типоразмера лепестковых спиралевидных трубок не влияет на их теплообменные характеристики. Недостатком трубок с внутренними рёбрами является быстрое увеличение гидравлического сопротивления при эксплуатации из-за осаждения на них сажи отработавших газов микротурбины. Рассмотренные конфигурации теплообменных поверхностей реализованы в макетах теплообменников, а также подготовлен экспериментальный стенд для верификации расчетных исследований и проверки эффективности предложенных аддитивных теплообменников.

Проведенные расчетные исследования свидетельствуют о высоком потенциале применения аддитивных технологий для повышения эффективности работы рекуператоров микротурбин.

Список литературы

1. Scheithauer U., Kordaß R., Noack K., Eichenauer ect. Potentials and Challenges of Additive Manufacturing Technologies for Heat Exchanger // Advances in Heat Exchangers. 2018. 61 p.
2. Schnabel T, Oettel M, Müller B. Design for Additive Manufacturing: Guidelines and Case Studies for Metal Applications // Ottawa: Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, 2017. 110 p.

УДК 662.76

НОВЫЙ ПОДХОД К РАЗВИТИЮ ЭНЕРГОГЕНЕРАЦИИ НА ОРГАНИЧЕСКОМ ТОПЛИВЕ С НУЛЕВЫМИ ВЫБРОСАМИ

Рыжков А.Ф., Богатова Т.Ф., Масленников Г.Е., Осипов П.В.

Уральский федеральный университет, Екатеринбург

P-mail: a.f.ryzhkov@urfu.ru

Глобальная декарбонизация мировой энергетической системы требует разработки и реализации новых подходов к формированию энергогенерации нулевых выбросов. Применение возобновляемых источников энергии может в определенной степени решить проблему снижения загрязняющих атмосферу выбросов, но для индустриально развитых стран необходима диверсифицированная структура генерации, в которой мощности на органическом топливе являются стабилизирующим фактором. Это делает необходимым переход от линейной модели к так называемой круговой экономике обращения углерода с формированием нейтрально-углеродного цикла на базе устойчивых интеграционных цепочек с использованием выбросов диоксида углерода в качестве сырья для химической, строительной и других отраслей промышленности.

Понимание необходимости перехода к новому технологическому укладу поставило перед энергетическим производителем CO_2 требование поиска путей радикальной экологизации работы, а перед потребителем CO_2 – требование соответствия рабочих параметров процесса параметрам CO_2 на выходе из энергоустановок.

Традиционная *дорожная карта со стороны «производителя»* CO_2 – энергетической отрасли – исходит обычно из модели CCS, базирующейся на представлении о принципиальной невозможности вовлечения всех объемов техногенного CO_2 в хозяйственный оборот и ориентируется на наиболее энегозатартные и экономически непривлекательные технологии захоронения углекислого газа в геологические или океанические формации. Для осуществления этого углекислый газ на выходе из ТЭС должен, как правило, подвергаться глубокой очистке и высокой компрессии в узле согласования параметров CO_2 на выходе из энергоустановки и параметров CO_2 на входе к «потребителю».

Дорожная карта со стороны «потребителя» рассматривает возможности применения техногенного CO_2 в производственной деятельности (CCU) и включает:

1. Анализ эффективности и разработка проектов интеграции локальных производителей и потребителей CO_2;
2. Разработка новых специализированных технологий утилизации, обеспечивающих согласование параметров CO_2 на выходе из энергоустановки и на входе к потребителю.

Работа по решению первой задачи включает формирование территориальных промышленно-энергетических симбиозов локальных источников CO_2 и промышленных потребителей. Особое место занимает разработка прорывных технологий утилизации, приближенных по техническим требованиям к показателям источника, с ориентацией на выходные параметры CO2 (концентрация, давление, температура из действующих энергоустановок). Применительно к энергоустановкам с генерацией больших объемов низкоконцентрированных выбросов CO2 большие перспективы здесь открывают процессы ex-situ – CO2 минерализации [1] и CO2 биофиксации [2], позволяющих рассматривать малозатратную модель чистого производства энергии из ископаемых топлив.

Для оценки потенциала энергогенерации по перспективной малозатратной модели CCUS без блока улавливания и кондиционирования CO_2 и с сохранением эффективности на уровне, близком к безутилизационной работе ТЭС необходим согласованный анализ параметров генерации CO_2 энергоустановками и потенциала потребителей CO_2. Анализ проводится по трем основным наиболее чувствительным для процесса энергогенерации показателям: объемам (Q), рабочему давлению (P) и чистоте (R) с учетом уровня технологической зрелости (T), рыночной привлекательности (M) и коэффициента преобразования K_{CO2}.

Совместный анализ парка действующих энергоустановок из перечня BAT, дополненный новейшими перспективными разработками Oxy-fuel IGCC, и 18 основных технологий промышленных производств на основе потребления CO_2 из перечня IEA выявил три типа энерготехнологических симбиозов, работающих по малозатратной модели «ТЭС-потребитель» без промежуточного блока согласования выходных/входных параметров CO_2.

В Уральском федеральном университете разрабатываются концепция и ключевые технологические решения перспективной установки, представляющей собой энергопроизводственный симбиоз «энергоустановка – производство на базе CO_2», обеспечивающий малозатратную передачу CO_2 промышленному потребителю [3, 4]. Такая интеграция, использующая технологию минерализации, позволит утилизировать CO_2 и отходы в виде золы, шлака, отходов стройиндустрии с получением новой продукции.

Список литературы

1. Aresta M., Dibenedetto A., Quaranta E. State of the art and perspectives in catalytic processes for CO_2 conversion into chemicals and fuels: The distinctive contribution of chemical catalysis and biotechnology// Journal of Catalysis. 2016. V. 343. P. 2-45.
2. X. Zhang. Microalgae removal of CO2 from flue gas. London. IEA Clean Coal Centre. 2015. 95 P.
3. Анализ технологических решений для ПГУ с внутрицикловой газификацией угля / Н. А. Абаимов, А. Ф. Рыжков [и др.]; под ред. А. Ф. Рыжкова. – Екатеринбург: УрФУ. 2016. 564 с.
4. Kagramanov Y., Tuponogov V., Ryzhkov A., Nikitin A. Multiple Gas-Solid Reactions in a Porous Sorbent Applied to Warm Gas Desulfurization // Ind. Eng. Chem. Res. 2020.

Работа поддержана в рамках постановления № 211 Правительства РФ, контракт № 02.A03.21.0006

УДК 621.039.5//544.351.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАССОПЕРЕНОСА БОРНОЙ КИСЛОТЫ С ПАРОМ ПРИ ПАРАМЕТРАХ ХАРАКТЕРНЫХ ДЛЯ АВАРИЙНОГО РЕЖИМА АЭС С ВВЭР

Сахипгареев А.Р., Шлепкин А.С., Морозов А.В.

АО «ГНЦ РФ – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского», Обнинск

e-mail: asakhipgareev@ippe.ru

В настоящее время одной из важнейших проблем в атомной энергетике является обеспечение недопущения тяжелых аварий. В современных проектах атомных электростанций (АЭС) с реакторами ВВЭР эта проблема решается путем применения пассивных систем безопасности, которые обеспечивают существенное преимущество по сравнению с атомными электростанциями предыдущих поколений [1].

В случае возможной аварии, связанной с разрывом главного циркуляционного трубопровода, произойдет резкое снижение давления в первом контуре и переход к кипящему режиму охлаждения активной зоны.

Для компенсации потери теплоносителя из первого контура в современных проектах АЭС с ВВЭР предусмотрена система пассивного залива активной зоны (СПЗАЗ) из гидроемкостей первой, второй и третьей ступеней. Гидроемкости СПЗАЗ заполнены раствором борной кислоты (H_3BO_3) с концентрацией 16 г/кг H_2O. Данная система срабатывает в случае снижения давления в активной зоне ниже определенного уровня.

Поступление охлаждающей жидкости из гидроемкостей с одной стороны обеспечивает аварийное охлаждение тепловыделяющих элементов, однако, с другой стороны, принимая во внимание кипение теплоносителя в реакторе, следует ожидать увеличения концентрации борной кислоты в нижней части активной зоны. При этом из-за поступления дополнительного объема борной кислоты в реактор возможно превышение ее предела растворимости (~400 г/кг H_2O) через сутки после начала аварии, что может привести к ухудшению теплоотвода.

Однако в процессе кипения с паром происходит частичное удаление борной кислоты из реактора с паром или вследствие капельного уноса, что может снизить риск ее кристаллизации. Таким образом, исследование процессов выноса борной кислоты из активной зоны имеет важное прикладное значение для расчетов аварийных режимов на АЭС с ВВЭР нового поколения, оснащенными пассивными системами безопасности.

Анализ литературных источников показал, что существующие данные охватывают ограниченный диапазон параметров (температура и концентрация кислоты), не характерный для аварийной ситуации на российских АЭС с ВВЭР [2]. По этой причине возникла необходимость проведения дополнительных экспериментов в расширенном диапазоне концентраций и температур, для использования полученных данных в расчетных оценках.

В АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» были проведены эксперименты по определению величины растворенной в паре борной кислоты при параметрах характерных для возможной аварии на АЭС с ВВЭР. Для этого была создана экспериментальная установка (рис. 1).

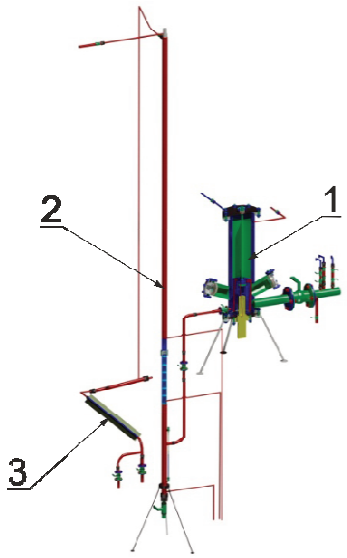


Рис. 1. Расположение основного экспериментального оборудования на стенде. 1 – бак подготовки раствора, 2 – рабочий участок, 3 – конденсатор

В докладе представлены результаты опытов в диапазоне давлений 0,1–0,3 МПа, соответствующем аварийному режиму на АЭС с ВВЭР, и начальной концентрации борной кислоты 16 г/кг H_2O. Была получена зависимость, позволяющая рассчитывать растворимость H_3BO_3 в паре. Диапазон применимости формулы расширен до концентрации 440 г/кг, близкой к пределу растворимости борной кислоты в воде при давлении 0,3 МПа.

Данные, полученные в результате проведенных экспериментов, могут быть использованы для расчетного моделирования аварийных процессов в реакторной установке ВВЭР во время работы пассивных систем безопасности.

Список литературы

1. Морозов А.В., Ремизов О.В. Экспериментальное обоснование проектных функций дополнительной системы пассивного залива активной зоны реактора ВВЭР // Теплоэнергетика. 2012. № 5. С. 22–27.
2. Морозов А.В., Питык А.В., Рагулин С.В., Сахипгареев А.Р., Сошкина А.С., Шлепкин А.С. Оценка влияния капельного уноса борной кислоты на ее накопление в реакторе ВВЭР в случае аварии // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2017. № 4. С. 72–82.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №16-19-10649)

УДК 662.636

ПЕРЕРАБОТКА ОТХОДОВ УГЛЕДОБЫЧИ И МУКОМОЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА В ЭКО-ГОРОШЕК

Табакаев Р.Б., Кан В.В.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

e-mail: TabakaevRB@tpu.ru

Современные тенденции развития топливно-энергетического комплекса направлены в сторону сокращения вредных выбросов и снижения отходов топливодобычи [1]. Как следствие этого, с каждым годом сокращается доля угля в топливно-энергетическом балансе, как топлива с высокой долей отходов при добыче и высокими выбросами вредных веществ (золы, ядовитых газов) [2].

В связи с этим целью настоящей работы является переработка отходов угледобычи (угольного штыба) в экологичное топливо.

В качестве исходного сырья рассмотрен штыб каменного угля Виноградовского разреза (Беловский район, Кузбасс), характеристики которого представлены в табл. 1. В качестве связующего вещества рассмотрены отходы мукомольного производства – пшеничные отруби. Пробы сырья доведены до воздушно-сухого состояния.

Табл. 1. Характеристики исходного сырья.

Характеристика	Уголь	Отруби
Влажность W^a, %	8,0	8,6
Зольность на сухую массу A^d, %	17,1	6,9
Выход летучих веществ V^{daf}, %	35,8	81,0
Низшая теплота сгорания Q_i^r, МДж/кг	23,0	16,6

Предварительно пробы угля измельчены до фракции менее 2,5 мм, отруби – менее 0,5 мм. Исследовано влияние количества добавляемых отрубей (от 4 до 20%) в составе формовочной смеси на характеристики получаемых гранул. Учитывая, что одним из основных показателей формованного топлива топлива является его прочность (ГОСТ Р 57016–2016), за главный показатель приняты прочность на сбрасывание и истирание в барабане, определяемые согласно ГОСТ 21289-75 и ГОСТ 34090.1-2017 соответственно.

Результаты испытаний цилиндрических гранул диаметром 20 мм и длиной 20 мм, полученных в пресс-форме при различном усилии прессования и температуре 120°С, представлены на рис. 1. Видно, что при доле отрубей 10% и выше усилие прессования не оказывает существенного влияния на прочность гранул. Оптимальной долей добавки отрубей является 10%: при этой величине обеспечиваются высокая прочность и теплота сгорания гранул (из табл. 1 видно, что чем выше доля отрубей, тем будет меньше теплота сгорания угольных гранул).

Проведена апробация лабораторных исследований на промышленной установке экструдерного типа (рис. 2). При этом использована угольная смесь с 10%-м содержанием отрубей и влажностью 25%. В процессе прессования за счет истирания исследуемая смесь прогревалась до 120°С (температура корпуса установки в области фильеры). Прочность гранул составила – 99% на сбрасывание и 90% на истирание.

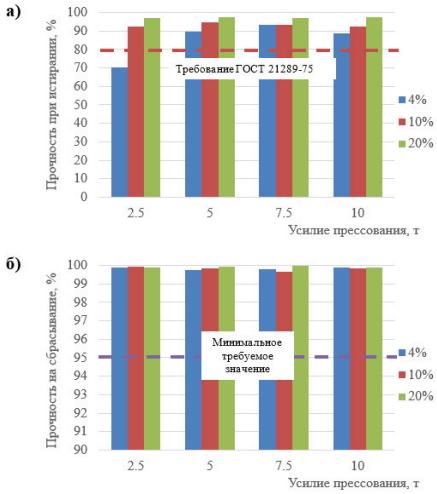


Рис. 1. Влияние количества связующего (отрубей) и давления прессования на механические характеристики гранул: а) прочность на истирание; б) прочность при сбрасывании.



Рис. 2. Промышленная установка изготовления эко-горошка.

Заключение

Экспериментально определены и промышленно апробированы параметры получения гранулированого топлива (эко-горошка) из отходов угледобычи и мукомольного производства.

Список литературы

1. Key world energy statistics (International Energy Agency, Paris, 2018).
2. Злобина Е.С. Получение альтернативного топлива из неликвидной продукции угольной промышленности // Сб. науч. трудов конференции «Экологические проблемы промышленно развитых и ресурсодобывающих регионов: пути решения». Кемерово. Изд-во КузГТУ. 2016. С. 43–48.

Работа выполнена при поддержке РНФ (№ 19-79-00085)

УДК 621.039.5

ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ ДЛЯ АНАЛИЗА ДВИЖЕНИЯ РАСПЛАВА ПО ПОВЕРХНОСТИ ТВЭЛА

Усов Э.В.[1], Лобанов П.Д.[1,2], Климонов И.А.[1]

[1] Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва
[2] Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск

e-mail: usovev@gmail.com

Первый этап тяжелой аварии в реакторной установке сопровождается разрушением твэлов в ней. Причиной разрушения твэлов является нарушение теплового баланса в зоне, вызванное либо снижением интенсивности охлаждения твэлов из-за снижения расхода при неизменном энерговыделении, либо резким ростом энерговыделения из-за введения избыточной положительной реактивности.

Для численного расчета подобных процессов с целью анализа последствий тяжелых аварий должны быть развиты алгоритмы, основанные на современном представлении об особенностях разрушения твэлов. Конструкция твэлов быстрых реакторов предполагает наличие как активной части, в которой происходит основное энерговыделение, так и бланкета, в котором энерговыделение фактически отсутствует. Наличие холодной бланкетной части может серьезным образом влиять на движение расплава из-за его затвердевания. Одним из препятствий для развития алгоритмов является отсутствие надежных экспериментальных данных.

В настоящей работе на основе анализа экспериментов, которые были выполнены на имитаторах твэлов с оболочкой из легкоплавких металлов, предложены модели для моделирования плавления и движения расплава по поверхности твэлов.

Представленная работа является продолжением экспериментальных и теоретических работ, проводимых совместно в ИБРАЭ РАН и ИТ СО РАН – по изучению особенностей движения расплава по цилиндрической поверхности, имитирующей поверхность твэла, а также анализу факторов, которые определяют термическое разрушение твэлов.

Одним из важных выводов при анализе экспериментальных данных был вывод о преобладающем пленочном ламинарном режиме стекания в обогреваемой части имитатора твэла. С использованием данного предположения была построена аналитическая модель, позволяющая предсказывать величину массы, вынесенную за пределы твэла во время его плавления.

В результате расчетов с использованием предложенной модели было показано, что для аварии с введением положительной реактивности, когда рост мощности может достигать 10 номиналов, необходима модификация модели для учета турбулентного режима стекания. Для этого случая была построена упрощенная модель движения расплава. Проведено сравнение с известными методиками и показано, что предложенный подход позволяет с близкой точностью описывать турбулентный режим течения.

Модифицированная модель позволила рассчитать особенности движения расплава нержавеющей стали по поверхности твэла. Была получена информация о толщине расплава, его скорости числе Рейнольдса в зависимости от условий стекания, а также о массе, вынесенной за пределы активной зоны. Пример приведен на рис. 1.

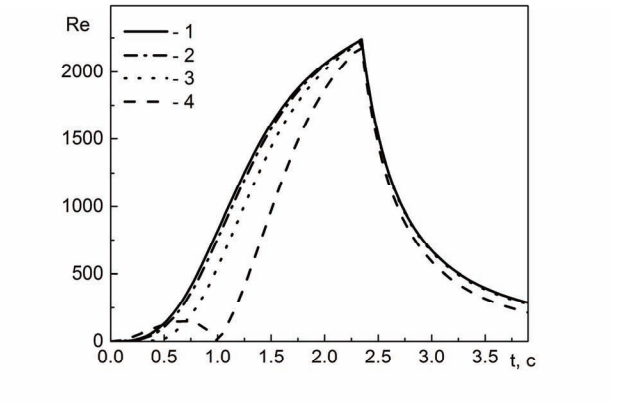


Рис. 1. Расчетное изменение числа Рейнольдса от времени для стали при разных скоростях обдува газовым потоком. 1 – Vg=0, 2 – Vg=50, 3 – Vg=100, 4 – Vg=150 м/с.

Список литературы

1. Lobanov P., Pribaturin N., Svetonosov A., Usov E., Evdokimenko I. Experimental investigation of liquid metal behavior in gas counter flow // Proceedings of ICONE-27 27th International Conference on Nuclear Engineering May 19-24. 2019. Ibaraki. Japan. ICONE27-2212.
2. Pribaturin N., Lobanov P., Svetonosov A., Usov E., Zhdanov V., Evdokimenko I. Experimental modeling of fuel pins cladding melting while severe accident in lead cooled reactor // Proceedings of ICONE-27 27th International Conference on Nuclear Engineering May 19–24. 2019. Ibaraki. Japan. ICONE27-2220
3. Usov E.V., Butov A.A., Lezhnin S.I., Lobanov P.D. Solving the Stefan problem in the relation to melting of fuel elements of fast nuclear reactors. // Journal of Engineering Themophysics. 2018. V. 27. № 4. P. 545–553.
4. Usov E.V. Analytical investigation of the fuel rod destruction and melt relocation along the surface of the fuel rod // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1382. P. 012146. doi:10.1088/1742-6596/1382/1/012146
5. Jackson M. Liquid films in viscous flow // AIChE J. 1955. V. 1. № 2. P. 231–240.
6. Karapantsios T., Paras S., Karabelas A. Statistical characteristics of free falling films at high Reynolds number // Int. J. Multiphase Flow. 1989. V. 15. I. 1. P. 1–21.
7. Henstock W.H., Hanratty T.J. The Interfacial Drag and the Height of the Wall Layer in Annular Flows // AiChE Journal. 1976. V. 22. № 6. P. 990–1000.
8. Гешев П.И. Простая модель для расчета толщины турбулентной пленки жидкости, увлекаемой силой тяжести и потоком газа // Теплофизика и Аэромеханика. 2014. Т. 21. № 5. С. 579–586.

Работа поддержана РНФ (грант № 18-79-10013)

УДК 620.91

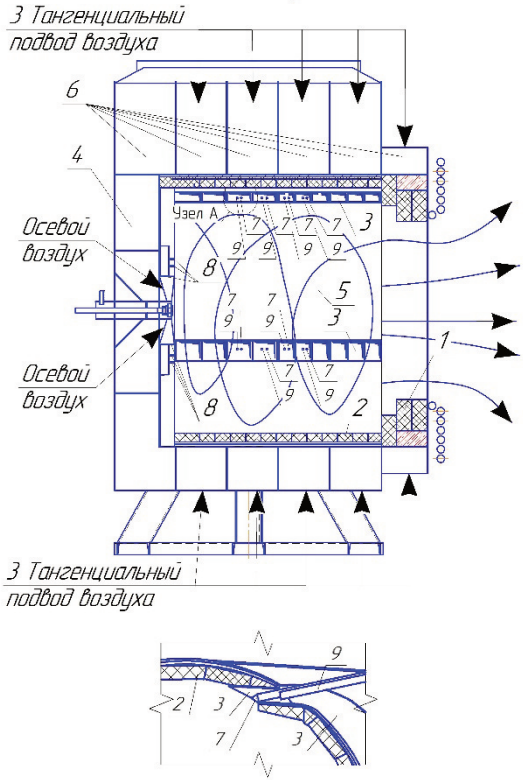
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ВИХРЕВОГО ПРОЦЕССА СЖИГАНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Штым К.А., Соловьёва Т.А.

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

e-mail: shtym.ka@dvfu.ru

На основании многолетнего опыта эксплуатации и детальных исследований вихревого сжигания природного газа в циклонно-вихревых предтопках (ЦВП) определено, что многоступенчатая комбинированная схема подвода воздуха (аксиально и тангенциально) и ступенчатое равномерное распределение газа (через аксиальные, торцевые и тангенциальные сопла) позволяет добиться полного предварительного смесеобразования и интенсификации тепло и массообмена в объёме камеры сгорания (КС) ЦВП [1, 2, 3].



Узел А (вид сбоку)

Рис. 1. Конструкция газо-мазутного ЦВП мощностью 65 МВт: 1 – пережим; 2 – обмуровка; 3 – тангенциальный подвод воздуха; 4 – торцевая вихревая камера; 5 – камера сгорания; 6 – воздушные обечайки; 7 – тангенциальные газовые сопла; 8 – аксиальные, торцевые газовые сопла; 9 – второй ряд тангенциальных газовых сопел

Исследования выполняются на водогрейном котле КВГМ 100-150 МЦ Владивостокской ТЭЦ-1, оснащенном двумя газо-мазутными ЦВП встречной компоновки мощностью 65 МВт каждый. Исследования теплообмена в обмуровке ЦВП [4, 5, 6, 7], опыт предварительного смесеобразования в ЦВП котла БКЗ-120-100 Охинской ТЭЦ [7] дают основания для усовершенствования конструкции ЦВП (см. рис.1). Особенность этого предтопка заключается в наличие второго ряда тангенциальных газовых сопел для предварительного смесеобразования (поз. 9, см рис. 1), работа которых рекомендуется при нагрузках котла более 70% от номинальной (100 Гкал/ч). Стенка обмуровки ЦВП, на нагрузках более 70 % от номинальной, за счёт увеличения скорости газовоздушного потока и снижения времени пребывания факела в КС ЦВП охлаждается быстрее чем на нагрузках менее 70% от номинальной и не превышает в среднем 600°С (420÷660°С) [6]. При нагрузке котла 90% от номинальной температуры стенки обмуровки КС ЦВП изменяются от 344 до 586°С [6].

Температура газовоздушного потока в пристенной области КС ЦВП (на расстоянии ≤100 мм от обмуровки) при нагрузке 50÷70 Гкал/ч составляет 250–300°С, а с ростом нагрузки снижается и составляет 100–200°С [2, 7]. На нагрузках ≤70 % от номинальной тангенциальная составляющая вектора полной скорости газовоздушного потока в пристенной области составляют 20–30 м/с [2], с ростом нагрузки скорость возрастает до 70–90 м/с [9].

Таким образом, на нагрузках котла >70% от номинальной подключение тангенциальных газовых сопел второго ряда, позволит увеличить долю топлива, сжигаемого в КС ЦВП при надежном охлаждении внутренней обмуровки, улучшить условия теплообмена в топке и увеличить мощность котла.

Список литературы

1. Штым А.Н., Штым К.А., Дорогов Е.Ю. Котельные установки с циклонными предтопками // Владивосток: Изд. дом Дальневосточ. федер. ун-та. 2012. 421 с.
2. Соловьёва Т.А. Совершенствование процесса сжигания природного газа в котельных установках с циклонными предтопками: дис. канд. техн. наук: Красноярск. 2017. 149 с.
3. Штым К.А., Соловьёва Т.А., Лесных А.В., Гончаренко Ю.Б. Особенности формирования приосевой области в циклонно-вихревом предтопке с комбинированной генерацией закрученного потока // III Всероссийская научная конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика» с элементами школы молодых ученых. Ялта. Россия. 2018.
4. Штым К.А., Соловьёва Т.А., Кулик А.В. Исследование распределения температурных полей в циклонном предтопке // IV Всероссийская научная конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика» с элементами школы молодых ученых. Ялта. Россия. 2019.
5. Штым К.А., Дорогов Е.Ю., Соловьёва Т.А., Кулик А.В. Исследование теплообмена в циклонном предтопке // VII Всероссийская конференция с международным участием «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках». Рыбинск. Россия. 2019.
6. Кулик А.В., Дорогов Е.Ю. Соловьёва Т.А., Бибиков Д.Р. Измерение температур в обмуровке циклонно-вихревого предтопка // Всероссийская конференция «XXXV Сибирский теплофизический семинар». Новосибирск. Россия. 2019.
7. Лесных А.В., Штым К.А., Упский М.В. Методы снижения выбросов оксидов азот в котлах с воздухоохлаждаемыми циклонно-вихревыми предтопками // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2020. Т. 13(1). Р. 69–83.
8. Головатый С.В., Штым К.А., Соловьёва Т.А. Интенсификация смесеобразования в циклонно-вихревом предтопке при сжигании природного газа // Сб. материалов IX Всероссийской конференции с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения». Новосибирск. Россия. 2015.

Содержание

Пленарные лекции

Деревич И.В., Панова А.А. Анализ стадий эпидемии КОВИД-19 на основе вариационных методов 5
Исаев С.А., Попов И.А., Михеев Н.И., Гувернюк С.В., Никущенко Д.В., Судаков А.Г. Перспективные луночные технологии вихревой интенсификации тепло- и массообменных процессов в энергетике и микроэлектронике 6
Кабов О.А. Испарение, кипение и динамические сухие пятна в тонких жидких пленках при интенсивном нагреве 7
Кузнецов В.В. Неравновесные и волновые процессы при фазовых переходах и химических реакциях в газожидкостных системах 8
Немировский С.К. Квантовая турбулентность: теоретические и численные проблемы 9
Рудяк В.Я., Белин А.А., Третьяков Д.С. Особенности процессов переноса наножидкостей с углеродными нанотрубками. эксперимент и молекулярно-динамическое моделирование 10
Смирнов Е.М. Вихревые структуры и локальный теплообмен в свободно-конвективном пограничном слое, возмущенном трехмерными препятствиями 11
Сон Э.Е. Искусство и турбулентность: спектры на картинах великих мастеров, начиная от Леонардо да Винчи 12
Терехов В.В., Терехов В.И. Интерференция струйных и отрывных потоков 13

Секция 1. Теплообмен и гидродинамика в однофазных средах

Бендерский Б.Я., Чернова А.А. Теплообмен в заманжетной полости крупногабаритного РДТТ 17
Богатко Т.В., Терехов В.И. Влияние минитурбулизатора на течение и теплообмен в трубе с внезапным расширением 18
Бойко А.В., Демьянко К.В., Кириловский С.В., Нечепуренко Ю.М., Поплавская Т.В. О прогнозе положения перехода к турбулентности в трехмерных пограничных слоях тел в трансзвуковом потоке 19
Веретенников С.В., Евдокимов О.А., Сергеев М.Н. Нестационарное численное моделирование газодинамической струкутры потока в вихревой трубе Ранка-Хилша 20
Вертгейм И.И., Закс М.А., Сагитов Р.В., Шарифулин А.Н. Устойчивость и нелинейные вторичные режимы двоякопериодических течений с прокачкой 21
Давлетшин И.А., Михеев Н.И., Шакиров Р.Р. Теплоотдача и кинематическая структура турбулентного потока в диффузоре 22
Дееб Равад (Сирия), Сиденков Д.В. Численное моделирование характеристик теплообмена и коэффициента трения шахматного пучка сдвоенных труб круглой и каплевидной формы при поперечном потоке 23
Дектерев А.А. Расчетно-экспериментальное исследование аэродинамики циклического движителя 24
Зарипов Д.И. Механизм формирования обратных пристеночных течений в безградиентном пограничном слое 25
Иванова Я.Ф., Юхнев А.Д., Гатаулин Я.А., Смирнов Е.М., Врабий А.А., Вавилов В.Н. Численное и экспериментальное моделирование течения в месте соединения кровеносного сосуда с протезом 26
Ильченко М.А., Французов М.С. Расчетно-экспериментальные исследования интенсификации конвективного теплообмена в каналах с помощью акустических колебаний 27
Кадыйров А.И., Вачагина Е.К. Теплообмен при течении жидкости Фан-Тьен Таннера в плоской щели 28
Кадыйров А.И., Караева Ю.В., Зарипов Р.Р., Вачагина Е.К. Течение жидкости Гиезекуса при обтекании цилиндра между двумя параллельными пластинами 29
Карлович Т.Б., Сухоцкий А.Б., Данильчик Е.С. Образование квазипериодических структур при смешанной конвекции воздуха в вытяжной шахте над горизонтальным пучком из оребренных труб 30
Королева А.П., Кузьменков Н.В., Французов М.С. Применение методов машинного обучения при исследовании эффективности интенсификации теплообмена в круглой трубе с искусственной шероховатостью 31
Королева А.П., Французов М.С. Расчетно-экспериментальное исследование влияния трехмерной структуры течения на теплоотдачу в спиральном теплообменнике 32
Кусюмов А.Н., Михайлов С.А., Кусюмов С.А., Романова Е.В. Моделирование корреляционных функций изотропной турбулентности на основе уравнения Кармана-Ховарта 33
Макаров М.С., Макарова С.Н. Влияние длины сверхзвукового сопла на эффективность энергоразделения газовой смеси с малым числом Прандтля в оребрённой одиночной трубе Леонтьева 34
Михеев А.Н., Михеев Н.И., Давлетшин И.А. Влияние периодических изменений скорости потока на характеристики турбулентности за выступом в канале 35
Михеев Н.И., Душин Н.С., Шакиров Р.Р. Структура потока и теплообмен в канале с низкой дискретной шероховатостью стенки 36

Молочников В.М., Мазо А.Б., Калинин Е.И., Паерелий А.А., Клюев М.А. Формирование смерчеобразных вихрей при обтекании цилиндра в канале при умеренных числах рейнольдса 37
Наумкин В.С., Терехов В.И. Энергоразделение в вихревой трубе при ламинарном режиме работы 38
Наумов И.В., Шарифуллин Б.Р., Штерн В.Н. Управление распадом вихря в ограниченных двухжидкостных течениях 39
Палкин Е.В., Мулляджанов Р.И., Хадзиабдич М., Ханъялич К. Активные теплоперенос и управление потоком вокруг цилиндра вращательными колебаниями 40
Сендеров М.В. Влияние потоков тепла на формирование вертикальной халинной стратификации в Черном море по результатам численного моделирования 41
Скрипкин С.Г., Цой М.А., Наумов И.В. Трассерная визуализация распада вихря в проточных и ограниченных течениях 42
Терехов В.В., Барсуков А.В., Терехов В.И. RANS и LES моделирование пассивного управления отрывным потоком за внезапным расширением канала 43
Терехов В.В., Чохар И.А., Филиппов М.В. Взаимодействие параллельных турбулентных кольцевых струй 44
Токарев М.П., Палкин Е.В., Мулляджанов Р.И. Управление потоком за цилиндром с вращательными осцилляциями с использованием численного моделирования и машинного обучения 45
Федюшкин А.И. Об изменении конвективного тепломассопереноса и свободной поверхности в переменном гравитационном поле Земли 46
Хазов Д.Е. Бесскачковое торможение сверхзвукового потока в канале постоянного сечения 47
Чумаков Ю.С., Левченя А.М., Смирнов Е.М. Расчетно-экспериментальное исследование течения в окрестности куба, погруженного в турбулентный свободноконвективный пограничный слой на вертикальной пластине 48
Шарифуллин Б.Р., Наумов И.В., Ломакина В.А., Окулов В.Л. Экспериментальное исследование влияния нано- и микро-шероховатостей на закрутку потока в ограниченном вихревом потоке 49

Секция 2. Гидродинамика и тепломассообмен в многофазных системах

Ануфриев И.С., Копьев Е.П., Шадрин Е.Ю. Исследование характеристик распыления водоугольной суспензии 53
Булатова А.З., Солнышкина О.А., Фаткуллина Н.Б. Трехмерное моделирование динамики одиночных пузырьков в микроканале с поперечным сечением в форме дельтоиды 54
Бусов К.А., Мажейко Н.А. Вскипание струи перегретой воды при истечении через цилиндрический и квадратный каналы 55
Бусов К.А., Мажейко Н.А., Жилкин Б.П., Плотников Л.В. Исследование струи вскипающей воды методом инфракрасной теплометрии 56
Валиуллина В.И., Муллаянов А.И., Мусин А.А., Киреев В.Н., Ковалева Л.А. Экспериментальное исследование и математическое моделирование гравитационного расслоения полидисперсной эмульсии типа вода в масле 57
Вожаков И.С., Роньшин Ф.В. Численное исследование режима Тейлора в миниканале квадратного сечения 58
Воробьев М.А., Кашинский О.Н. Локальные теплогидравлические характеристики пузырькового потока в сборке стержней 59
Грибин В.Г., Тищенко В.А., Попов В.В., Тищенко А.А., Гаврилов И.Ю., Алексеев Р.А. Основные числа подобия, характеризующие процесс внутриканальной сепарации водяной пленки в проточных частях паровых турбин 60
Грибин В.Г., Тищенко В.А., Попов В.В., Тищенко А.А., Гаврилов И.Ю., Алексеев Р.А. Экспериментальное исследование интегральных характеристик внутриканальной сепарации в сопловой турбинной решетке 61
Давыдов М.Н., Чернов А.А., Пильник А.А. Динамика газового пузырька при линейной декомпрессии жидкости 62
Дементьев Ю.А., Роньшин Ф.В., Чиннов Е.А. Экспериментальное исследование характеристик двухфазного течения в щелевом микроканале 63
Зайцев Д.В., Шатекова А.И. Левитация упорядоченного массива из микрокапель над поверхностью нагретой жидкости 64
Залкинд В.И., Зейгарник Ю.А., Низовский В.Л., Низовский Л.В., Щигель С.С. Особенности диагностики дисперсионных характеристик распылов перегретой воды в конфузорно-диффузорных соплах, обобщение результатов 65
Заноско А.И., Дедов А.В., Беляев А.В. Методы расчета критического теплового потока при кипении R125 в миллиметровом канале при высоких давлениях 66
Ивочкин Ю.П., Исмаилов А.М., Кубриков К.Г., Тепляков И.О. Исследование механизмов взаимодействия расплава и охладителя посредством маломасштабных экспериментов с твердыми и жидкими металлическими образцами 67

Карпов П.Н., Назаров А.Д., Серов А.Ф., Терехов В.И. Экспериментальное исследование теплообмена при импактном натекании одиночного импульса спрея различной длительности ... 68
Козулин И.А., Барткус Г.В., Кузнецов В.В. Динамика взрывного кипения смесевых композиций на микронагревателе ... 69
Кондаурова Л.П., Андрющенко А.В. Энергетический спектр и свойства реконнектирующих квантовых вихревых линий ... 70
Кравченко М.Н., Диева Н.Н., Фатыхов Г.А. Учет термодинамических особенностей генерации углеводородов из матрицы коллектора при гидротермовоздействии ... 71
Куприянов А.В., Молодцов А.А., Осин А.Б., Сорокин В.Д., Шипов Д.Л., Морозкин О.Н. Экспериментальные исследования теплотехнических характеристик на моделях ТВС-КВАДРАТ для реакторов PWR ... 72
Литвинцева А.А., Чеверда В.В. Влияние размеров пористого слоя на процессы в тепловой трубе ... 73
Лобасов А.С., Минаков А.В. Численное исследование течения жидкости вдоль ультрагидрофобной текстурированной поверхности ... 74
Мелешкин А.В., Глезер В.В., Марасанов Н.В., Миронова Н.Н., Мариковская С.М. Влияние температуры воды на рабочем участке на синтез газового гидрата методом кипения-конденсации гидратообразующего газа в объеме воды ... 75
Минаков А.В., Лобасов А.С, Зайцев Д.В., Кабов О.А. Разработка математической модели испарительной системы с пленочными потоками ... 76
Орлова Е.Г., Феоктистов Д.В. Анализ потенциально опасных процессов, обусловленных коррозией ёмкостей для хранения и транспортировки гелеобразных топлив на основе маслонаполненных криогелей ... 77
Рютин С.Б., Скрипов П.В. Сверхкритический теплоперенос в растворах с нижней критической температурой растворения ... 78
Сажин И.А. Увеличение теплоотдачи испарителя холодильной установки ... 79
Сморчкова Ю.В., Ильин В.В., Штелинг В.С., Захаренков А.В., Комов А.Т., Щербаков П.П. Исследование охлаждения высокотемпературной поверхности диспергированным потоком теплоносителя ... 80
Тупотилов И.А., Варава А.Н., Дедов А.В., Захаренков А.В., Комов А.Т., Локтионов В.Д., Мирнов С.В., Сморчкова Ю.В. Исследование теплообмена на модели тепловыделяющей сборки с шаровой засыпкой ... 81
Фазлетдинов С.У., Питюк Ю.А., Фахреева Р.Р. Численное исследование фильтрации водогазовой смеси при акустическом воздействии ... 82
Федюшкин А.И. Влияние конвекции на положение свободной поверхности жидкости на земле и в невесомости ... 83
Цвелодуб О.Ю. Моделирование волновых режимов при противоточном течении пленки жидкости и турбулентного потока газа ... 84
Элоян К.С., Роньшин Ф.В., Литвинцева А.А., Чеверда В.В. Теплообмен в миниканале с локальным гладким нагревателем созданного на базе аддитивных технологий ... 85
Юлмухаметова Р.Р., Мусин А.А., Ковалева Л.А. Численное моделирование ламинарного течения вязкой несжимаемой жидкости со взвешенными твердыми частицами в плоском канале при наличии утечки жидкости через верхнюю грань ... 86
Ячевский И.А., Королёв П.В., Пузина Ю.Ю., Крюков А.П. Формирование замкнутой паровой пленки при кипении гелия-II на цилиндрическом нагревателе внутри пористой структуры ... 87

Секция 3. Фазовые переходы

Байдаков В.Г. Метастабильные состояния и их устойчивость при фазовом переходе жидкость–кристалл ... 91
Белослудов В.Р., Жданов Р.К., Гец К.В., Божко Ю.Ю., Субботин О.С. Термическое расширение гидратов водорода на основе льда ... 92
Бочкарева Е.М., Миськив Н.Б., Назаров А.Д., Терехов В.В, Терехов В.И. Экспериментальное исследование скорости испарения капель наножидкости с наночастицами SiO_2 ... 93
Дехтярь Р.А., Овчинников В.В. Экспериментальное исследование движения и формы парового пузыря, всплывающего в кольцевом канале при субатмосферном давлении ... 94
Жданов Р.К., Гец К.В., Божко Ю.Ю., Субботин О.С., Белослудов В.Р. Теоретическое исследование эффекта самоконсервации гидратов CF_4 ... 95
Жданов Р.К., Гец К.В., Божко Ю.Ю., Субботин О.С., Белослудов В.Р. Термодинамические свойства допированных гидроксидом калия гидратов метана и пропана ... 96
Князева А.Г., Коростелева Е.Н. Кинетические и теплофизические явления при синтезе пористых композитов из смесей порошков Ti + Si и Ti+Al+Si в режиме реакционного спекания ... 97
Кузнецов Д.В., Павленко А.Н., Чернявский А.Н., Радюк А.А. Интенсификация теплообмена при кипении азота на трубчатых нагревателях со структурированными капиллярно-пористыми покрытиями ... 98

Кулик А.В., Мокрин С. Н., Чудновский В.М., Минаев С.С. Экспериментальное исследование затопленной струи, возникающей при нагреве жидкости непрерывным лазерным излучением 99
Макаров М.С., Макарова С.Н. Температура инверсии при испарении водных растворов этанола и ацетона в турбулентный пограничный слой воздуха и перегретого пара равновесного состава 100
Макаров М.С., Макарова С.Н., Сюзаев А.И. Модель для расчёта смачиваемости микроструктурированной плоской стенки при испарении в пограничный слой 101
Маликов А.Г., Оришич А.М. Влияние структурно-фазового состава на механические характеристики лазерных сварных соединений алюминиево-литиевых сплавов 102
Мацкевич Н.И., Самошкин Д.А., Станкус С.В., Семерикова А.Н., Кузнецов В.А., Ткачев Е.Н. Теплоемкость ниобатов висмута, замещенных эрбием и лютецием, в интервале температур 190–370 K 103
Мацкевич Н.И., Станкус С.В., Чернов А.А., Шлегель В.Н., Семерикова А.Н., Самошкин Д.А., Зайцев В.П.Термодинамика монокристаллов вольфрамата лития с низким содержанием молибдена: теплоемкости, энтальпии, энергии решеток 104
Паршакова М.А., Липнягов Е.В. Изучение гетерогенной нуклеации в перегретом Н-пентане при разных скоростях понижения давления 105
Пономаренко Т.Г., Чеверда В.В. Исследование теплообмена в капле жидкости на сапфировой пластине 106
Рютин С.Б., Скрипов П.В Теплоперенос в сверхкритических флюидах: согласование результатов импульсных и стационарных опытов 107
Старинский С.В., Родионов А.А., Шухов Ю.Г., Сафонов А.И., Булгаков А.В. Формирование супергидрофильной микроструктуры при облучении кремния импульсами лазера наносекундной длительности 108
Стерлягов А.Н., Низовцев М.И, Бородулин В.Ю., Летушко В.Н. Влияние влажности воздуха на температуру испаряющихся водно-спиртовых капель 109
Филимонов М.Ю., Ваганова Н.А. Моделирование оптимальной эксплуатации добывающих скважин на северных нефтегазовых месторождениях 110
Чернов А.А., Пильник А.А., Владыко И.В. К теории роста парового пузырька в однородно перегретой жидкости 111
Чугунков Д.В., Кузма-Кичта Ю.А., Сейфельмлюкова Г.А. К расчёту теплоотдачи при плёночной и капельной конденсации пара на трубе с интенсификаторами теплообмена 112

Секция 4. Гидрогазодинамика реагирующих сред, детонационные процессы

Гвоздяков Д.В., Зенков А.В. Характеристики распыления спиртоводоугольных топлив 115
Евдокимов О.А., Михайлов А.С., Гурьянов А.И., Прохоров Д.А. Экспериментальные и численные исследования горения пылевидного торфа в закрученном противоточном течении 116
Козлов А.Н., Пензик М.В., Свищев Д.А., Баденко В.В. Исследование влияния температуры пиролиза древесной щепы в слоевом реакторе 117
Коротких А.Г., Сорокин И.В., Селихова Е.А., Архипов В.А. Термическое разложение и зажигание ВЭМ, содержащих бориды металлов 118
Коротких А.Г., Сорокин И.В., Селихова Е.А., Архипов В.А. Лазерное зажигание вращающихся образцов ВЭМ, содержащих алюминий 119
Ларионов К.Б., Громов А.А. Влияние нитратов металлов на процесс окисления углей различной стадии метаморфизма 120
Ларионов К.Б., Слюсарский К.В., Янковский С.А., Губин В.Е. Паровая газификация изношенных автомобильных шин для получения энергетически ценных продуктов 121
Ларионов К.Б., Мишаков И.В., Громов А.А. Снижение выделения оксида углерода и топливного недожога при активированном горении угля 122
Ларионов К.Б., Калтаев А. Ж., Слюсарский К.В. Исследование процесса горения отходов пивоваренной промышленности 123
Левашов В.Ю., Шишкова И.Н. Кинетический анализ начального этапа неравновесного возбуждения аргона 124
Левин А.А., Козлов А.Н., Сафаров А.С. Моделирование процесса конверсии твердого топлива в многостадийной газификационной установке 125
Лобасов А.С., Дектерев Ар.А., Дулин В.М. Экспериментальное и численное исследование нестационарного горения в модельной камере сгорания ГТУ 126
Майорова А.И., Васильев А.Ю., Соколова Е.И. Расчет горения бедной смеси в модельных камерах сгорания с закруткой потока 127
Моисеева К.М., Крайнов А.Ю., Рожкова Е.И. Решение задачи о распространении волны горения по газовзвеси древесной пыли 128
Сидоров Р.С. Численное исследование рабочего процесса в кольцевой детонационной камере сгорания малого диаметра 129

Слюсарский К.В., Кадчик Д.Ю., Асильбеков А.К. Исследование влияния давления
на пиролиз опилок и резины в среде аргона и диоксида углерода 130
Слюсарский К.В., Кадчик Д.Ю., Асильбеков А.К. Исследование пиролиза углей
различных марок в среде аргона, диоксида углерода и водяного пара 131
Сорокин И.В., Коротких А.Г., Селихова Е.А. Влияние бора, магния и меди
на зажигание ВЭМ, содержащего алюминий 132
Троцюк А.В. Численное исследование детонационных течений в сверхзвуковой камере 133

Секция 5. Численные методы в теплофизике и физической гидрогазодинамике

Артемов В.И., Макаров М.В., Минко К.Б., Яньков Г.Г. Моделирование методом LES
турбулентного течения и теплообмена в трубе в сопряженной со стенкой постановке 137
Бурмистров М.Е., Питюк Ю.А., Зарафутдинов И.А. Особенности динамики пузырька
вблизи твердых объектов в акустическом поле 138
Бухмастова С.В., Питюк Ю.А., Батырова Л.Д. Анализ индикаторных диаграмм методом CRMIP
для решения задачи взаимовлияния скважин 139
Волков-Музылёв В.В., Борисов Ю.А., Бесчастных В.Н. Разработка упрощённой
математической модели работы лепесткового газодинамического подшипника 140
Давыдов М.Н., Стояновская О.П., Глушко Т.А. Моделирование разлета газопылевого шара
методом SPH-IDIC 141
Дорофеев В.Л., Сухих Л.И. Изучение особенностей циркуляции
на северо-западном шельфе Черного моря по результатам физического реанализа 142
Котов М.А., Лаврентьев С.Ю., Соловьев Н.Г., Шемякин А.Н., Якимов М.Ю.
Динамика конвективного факела от лазерной плазмы в ксеноне при высоком давлении 143
Кузнецов В.А., Дектерев А.А., Минаков А.В. Математическое моделирование
процессов совместного горения пылеугольного и газового топлива 144
Кузнецов Г.В., Максимов В.И., Нагорнова Т.А. Численное моделирование теплопереноса
в крупногабаритном помещении при работающем газовом инфракрасном излучателе 145
Пузина О.С., Мизюк А.И. Структура мезомасштабных вихрей Черного моря
по результатам моделирования с различным пространственным разрешением 146
Саввинова Н.А., Слепцов С.Д., Гришин М.А. Моделирование таяния
рассеивающего излучение льда в однофазной постановке задачи Стефана 147
Смирнов Е.М., Левченя А.М., Иванов Н.Г., Смирновский А.А.
Опыт прямого численного моделирования свободноконвективного
пограничного слоя воздуха на вертикальной изотермической пластине 148
Солнышкина О.А. Динамика деформируемых капель в канале
с детерминированным боковым смещением элементов внутренней структуры 149
Ступникова А.В., Шарифулин А.Н. Гистерезисные переходы стационарной тепловой конвекции
в квадратной каверне с движущейся стенкой 150
Фахреева Р.Р., Питюк Ю.А., Асалхузина Г.Ф. Применение метода многопараметрической
линейной регрессии для гидропрослушивания скважин 151
Шепелев В.В., Иногамов Н.А., Фортова С.В. Гидродинамическое моделирование
затухания индуцированной лазером ударной волны в металле 152

Секция 6. Методы и средства теплофизического и гидрогазодинамического эксперимента

Антоневич Я.В., Зайцев Д.В., Кабов О.А. Прецизионное измерение пространственного
распределения температуры на поверхности тонкой капли,
испаряющейся на нагреваемой подложке 155
Двойнишников С.В., Рахманов В.В., Меледин В.Г., Садбаков О.Ю.
Метод фазовой триангуляции для измерения трехмерной геометрии
сложнопрофильных объектов в условиях динамических помех 156
Двойнишников С.В., Чубов А.С., Павлов В.А., Бакакин Г.В.
Оценка погрешности метода многоракурсной фазовой триангуляции
для измерения трехмерной геометрии выпуклых и протяженных объектов 157
Иншаков С.И., Кудрявцева Е.Д. Визуализация обтекания модели
сверхзвукового пассажирского самолёта на ракетном треке ГкНИПАС 158
**Кабардин И.К., Меледин В.Г., Двойнишников С.В., Павлов В.А., Бакакин Г.В.,
Мошаров В.Е., Самойленко А.И., Иншаков С.И.** Испытание лазерного измерителя
доплеровского ЛАД-08С на вторичном государственном эталоне
единицы скорости воздушного потока 159
**Кабардин И.К., Меледин В.Г., Двойнишников С.В, Троицкая Ю.И.,
Кандауров А.А., Сергеев Д.А.** Испытания возможностей лазерного доплеровского
измерителя скорости при диагностике кинематических параметров потока с образованием
брызг в рамках лабораторного моделирования ветроволнового взаимодействия 160

Кабардин И.К., Яворский Н.И., Меледин В.Г., Правдина М.Х., Гордиенко М.Р., Езендеева Д.П., Какаулин С.В., Усов Э.В., Климонов И.А.Экспериментальное определение границ применимости модели турбулентности Спаларта-Алмареса и модели переноса рейнольдсовых напряжений при управлении поворотно-дивергентным потоком 161
Колесников А.Ф., Щелоков С.Л. Анализ условий моделирования конвективного теплообмена в дозвуковых струях высокоэнтальпийного воздуха ВЧ-плазмотрона ВГУ-4 162
Крылов В.С., Птахин А.В.,, Кондратьев А.В. Методика расчета высокоэффективных конденсаторов пара высокотемпературных паротурбинных установок 163
Миськив Н.Б., Назаров А.Д., Мамонов В.Н., Серов А.Ф. Метод исследования процессов генерации тепла в многощелевом пространстве круговой системы Куэтта-Тейлора 164
Поплавский С.В. О реконструкции поля скорости газа по скорости частиц примеси в высокоградиентных потоках 165
Рахманов В.В., Двойнишников С.В., Семёнов Д.О., Главный В.Г. Измерение диаметра цилиндров с коррекцией ошибки смещения для нетелецентрической оптики 166
Семенов Д.О., Двойнишников С.В., Куликов Д.В., Меледин В.Г. Программно-аппаратная система визуальной диагностики внутренней полости вихревой камеры 167
Толстогузов Р.В., Шараборин Д.К., Лобасов А.С., Чикишев Л.М., Дулин В.М. Термометрия в закрученных пламенах методом плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции 168

Секция 7. Теплофизические свойства веществ, тепломассообмен на микро- и наномасштабах

Абдуллаев Р.Н., Хайрулин Р.А., Станкус С.В. Термические свойства железа в твердом и жидком состояниях 171
Агажанов А.Ш., Абдуллаев Р.Н., Самошкин Д.А., Станкус С.В. Переносные свойства жидких сплавов системы Rb–Bi 172
Агажанов А.Ш., Хайрулин А.Р., Абдуллаев Р.Н., Станкус С.В. Транспортные и калорические свойства эвтектического сплава K-Pb в жидком состоянии 173
Барбин Н.М., Якупова Л.В., Терентьев Д.И., Алексеев С.Г. Термодинамическое моделирование нагревания углеродных наночастиц C_{32} в среде азота 174
Бойко Е.В., Костогруд И.А., Смовж Д.В. Оптические свойства полимер-графеновых композитов с нанесенными наночастицами сплава золота и серебра 175
Исламова А.Г. Закономерностей между изменением текстуры поверхности стали (оцениваемой трехмерными параметрами шероховатости) и смачиванием 176
Казаков А.Н., Бодиков В.Ю., Блинов Д.В., Володин А.А. Исследования тепломассопереноса при диффузии водорода в системе щелочной электролит-металлогидридный материал 177
Конобеева Н.Н., Белоненко М.Б. Нагрев массива углеродных нанотрубок предельно короткими оптическими импульсами 178
Кочкин Д.Ю., Зайцев Д.В. Термокапиллярный разрыв и динамика контактной линии в нагреваемых слоях жидкости 179
Кравцова А.Ю., Кашкарова М.В., Янко П.Е., Бильский А.В., Кравцов Ю.В. Особенности течения жидкости в Т-образном элементе при малых числах Рейнольдса в зависимости от соотношения входных расходов 180
Мамылов С.Г., Скрипкина Т.С., Тихова В.Д., Бычков А.Л., Ломовский О.И. Термический анализ механохимически активированных гуминовых кислот бурого угля 181
Рамазанов Э.Р., Косой А.А. Способ представления теплофизических свойств веществ в виде электронных таблиц 182
Романов И.А., Борзенко В.И., Казаков А.Н. Улучшение теплопроводности металлогидридов с помощью формирования компактов 183
Роньшин Ф.В., Дементьев Ю.А. Экспериментальное исследование характеристик газожидкостного течения в щелевом микроканале 184
Савченко И.В. Источники данных о теплофизических свойствах металлов и сплавов 185
Сахипгареев А.Р., Шлепкин А.С., Морозов А.В. Экспериментальное исследование поверхностного натяжения высококонцентрированных растворов борной кислоты применительно к аварийному охлаждению ВВЭР 186
Смовж Д.В., Костогруд И.А., Морозова М.А., Бойко Е.В. Перенос графена с медной поверхности на кремниевые подложки 187
Фаткуллина Н.Б., Солнышкина О.А., Булатова А.З. Численное исследование течения вязкой жидкости в микроканалах с гидродинамическими ловушками 188
Хайрулин А.Р., Савченко И.В., Станкус С.В. Теплоемкость жидкого сплава $Cs_{80}Bi_{20}$ с частично ионным характером межатомного взаимодействия 189
Чеверда В.В., Пономаренко Т.Г. Исследование теплообмена в капле жидкости на тонкой фольге 190
Чугунков Д.В., Кузма-Кичта Ю.А., Сейфельмлюкова Г.А., Иванов Н.С. Интенсификация теплообмена при конденсации на поверхности с макро-, микро- и нанорельефом 191

Секция 8. Электрофизические явления в газовых и жидких средах

Зиннатуллин Р.Р., Султангужин Р.Ф. Исследования процессов взаимодействия электромагнитных полей с нефтематеринскими породами ... 195
Карзанов А.Н., Беляев М.В., Делягин В.Н., Чернов В.А., Лемешев О.П., Елистратов С.Л. Электроискровая технология воспламенения пылевидных топлив ... 196
Коробейников С.М., Ридель А.В., Карпов Д.И., Прокопенко Я.Г. Интенсификация электрогидродинамических течений с помощью углеродных нанотрубок ... 197
Куперштох А.Л. О контактных углах при наличии электрического поля ... 198
Куперштох А.Л., Лазебный Д.Б. Моделирование частичных разрядов в цепочке каверн на переменном напряжении ... 199
Листратов Я.И., Свиридов Е.В., Беляев И.А., Зиканов О.Ю., Колесников Ю.Б., Краснов Д.С. Механизмы переноса и структура течения в тонких сдвиговых слоях и струях различных типов под воздействием магнитных полей ... 200
Рожков А.Н. Всплески растворов полимеров в электрическом поле ... 201
Савенко Р.А., Медведев Р.Н. Экспериментальная оценка температуры индуктивно-связанной плазмы водяных паров с помощью закона Фурье ... 202
Султангужин Р.Ф., Зиннатуллин Р.Р., Ковалева Л. А. Исследование влияния электромагнитных полей на водонефтяные эмульсии ... 203

Секция 9. Теплообмен и гидродинамика в технологических процессах и защита окружающей среды

Астафьев А.В., Табакаев Р.Б. Влияние температуры на выход продуктов пиролитической переработки отходов мукомольного производства ... 207
Барбин Н.М., Кобелев А.М., Терентьев Д.И., Алексеев С.Г. Термодинамическое моделирование газоплазменной фазы при переработке радиоактивного графита в плазменной печи ... 208
Бесчастных В.Н., Борисов Ю.А., Косой А.С., Низовский Л.В. Разработка и экспериментальные исследования холодильной установки РЛС ... 209
Блинов Д.В., Дуников Д.О., Казаков А.Н. Металлогидридные топливные элементы ... 210
Васильев А.Ю., Челебян О.Г., Свириденков А.А., Домрина Е.С., Логинова А.А., Тарасенко А.Н. Способ пневматического распыла вспененных жидких топлив для перспективных камер сгорания газотурбинных двигателей ... 211
Вендланд Л.Е., Гаврилова Ю.А., Пугачук А.С. Применение теплонасосных установок для минимизации тепловых потерь с вентиляционным пропуском ... 212
Гантман М.Ю., Игрушкин С.И., Куликов Д.А., Леонтьев Н.И., Маслов М.Г., Смирнов В.А., Шмелев Е.И. Использование технологий цифрового двойника для обоснования акустических характеристик оборудования ... 213
Горбачев М.В., Терехов В.И. Моделирование процессов тепломассообмена при испарении пленки воды в горизонтальном канале ... 214
Демидов А.С., Тупотилов И.А., Захаренков А.В., Локтионов В.Д. Исследование теплообмена при охлаждении высоконагруженных элементов конструкций двухкомпонентным потоком теплоносителя ... 215
Дехтярь Р.А., Овчинников В.В. Исследование радиальной теплопроводности в канале с монослойной шаровой засыпкой ... 216
Диденко Д.В., Никаноров О.Л., Рогожкин С.А., Аксенов А.А., Жестков М.Н. Верификационные расчеты по ПС FlowVision для ВТГР ... 217
Дуников Д.О., Блинов Д.В., Борзенко В.И. Исследование кризиса тепломассопереноса в металлогидридном реакторе ... 218
Егошина О.В., Звонарева С.К. Модернизация типовых устройств для отбора проб воды и пара в системах химического контроля ТЭС ... 219
Елистратов Д.С. Опыт применения теплонасосной установки с вертикальным грунтовым теплообменником веерного типа в условиях Западной Сибири ... 220
Железнов А.П., Птахин А.В., Крылов В.С., Петрушин А.А. Исследование характеристик теплоутилизационной установки на базе энергетической ГТУ ... 221
Ибраева К.Т., Заворин А.С. Изучение минеральной части биомассы в процессе ее сжигания ... 222
Кондратьева О.Е., Росляков П.В., Локтионов О.А., Бурдюков Д.А. Основные проблемы создания систем непрерывного контроля выбросов энергетических объектов ... 223
Королева М.Р., Сабурова Е.А., Чернова А.А. Исследование эффективности охлаждения и сопротивления оребренных трубчатых элементов ... 224
Коротаев Г.К. Вихре-волновой режим геострофической турбулентности ... 225
Кузнецов Г.В., Максимов В.И., Нагорнова Т.А. Экспериментальное исследование распределения температур по поверхности объекта теплоснабжения в условиях нагрева газовым инфракрасным излучателем ... 226

Кузнецов Г.В., Чередник И.В., Толокольников А.А., Янковский С.А.
Влияние древесной биомассы на физико-химические превращения
при совместном высокотемпературном пиролизе с углями 227
Мешкова В.Д., Дектерев А.А., Литвинцев К.Ю. Использование CFD кода SigmaFlow
для моделирования ветровой среды вокруг группы зданий 228
Мизюк А.И., Лишаев П.Н., Коротаев Г.К., Пузина О.С. Оценки водообмена
через Керченский пролив на основе гидрологических измерений в Черном море 229
Мильман О.О., Картуесова А.Ю., Птахин А.В., Крылов В.С.
Расчетно-экспериментальные исследования параллельной работы
секций вакуумного конденсатора в условиях неравномерного теплосъема 230
Мильман О.О., Кондратьев А.В., Птахин А.В., Крылов В.С. Приближенная оценка термического
сопротивления контакта ребро – стенка для круглых труб с запрессованным оребрением 231
Низамутдинов В.Р., Пахолков В.В., Прокопцов И.С., Рогожкин С.А.
Расчётно-экспериментальные исследования гидродинамики арматуры для реакторных установок БН 232
Пугачук А.С., Фоминых Н.К., Гаврилова Ю.А. Моделирование тепловых и газодинамических
процессов в аддитивных кожухотрубных теплообменниках 233
Рыжков А.Ф., Богатова Т.Ф., Масленников Г.Е., Осипов П.В. Новый подход
к развитию энергогенерации на органическом топливе с нулевыми выбросами 234
Сахипгареев А.Р., Шлепкин А.С., Морозов А.В. Экспериментальное моделирование массопереноса
борной кислоты с паром при параметрах характерных для аварийного режима АЭС с ВВЭР 235
Табакаев Р.Б., Кан В.В. Переработка отходов угледобычи и мукомольного производства
в эко-горошек 236
Усов Э.В., Лобанов П.Д., Климонов И.А. Основные подходы для анализа движения расплава
по поверхности ТВЭЛа 237
Штым К.А., Соловьёва Т.А. Совершенствование вихревого процесса сжигания природного газа 238
Содержание 239
Авторский указатель 247

Авторский указатель

Абдуллаев Р.Н. 171, 172, 173
Агажанов А.Ш. 172, 173
Аксенов А.А. 217
Алексеев Р.А. 60, 61
Алексеев С.Г. 174, 208
Андрющенко А.В. 70
Антоневич Я.В. 155
Ануфриев И.С. 53
Артемов В.И. 137
Архипов В.А. 118, 119
Асалхузина Г.Ф. 151
Асильбеков А.К. 130, 131
Астафьев А.В. 207
Баденко В.В. 117
Байдаков В.Г. 91
Бакакин Г.В. 157, 159
Барбин Н.М. 174, 208
Барсуков А.В. 43
Барткус Г.В. 69
Батырова Л.Д. 139
Белин А.А. 10
Белоненко М.Б. 178
Белослудов В.Р. 92, 95, 96
Беляев А.В. 66
Беляев И.А. 200
Беляев М.В. 196
Бендерский Б.Я. 17
Бесчастных В.Н. 140, 209
Бильский А.В. 180
Блинов Д.В. 177, 210, 218
Богатко Т.В. 18
Богатова Т.Ф. 234
Бодиков В.Ю. 177
Божко Ю.Ю. 92, 95, 96
Бойко А.В. 19
Бойко Е.В. 175, 187
Борзенко В.И. 183, 218
Борисов Ю.А. 140, 209
Бородулин В.Ю. 109
Бочкарева Е.М. 93
Булатова А.З. 54, 188
Булгаков А.В. 108
Бурдюков Д.А. 223
Бурмистров М.Е. 138
Бусов К.А. 55, 56
Бухмастова С.В. 139
Бычков А.Л. 181
Вавилов В.Н. 26
Ваганова Н.А. 110
Валиуллина В.И. 57
Варава А.Н. 81
Васильев А.Ю. 127, 211
Вачагина Е.К. 28, 29
Вендланд Л.Е. 212
Веретенников С.В. 20
Вертгейм И.И. 21
Владыко И.В. 111
Вожаков И.С. 58
Волков-Музылёв В.В. 140
Володин А.А. 177
Воробьев М.А. 59
Врабий А.А. 26
Гаврилов И.Ю. 60, 61
Гаврилова Ю.А. 212, 233
Гантман М.Ю. 213
Гатаулин Я.А. 26
Гвоздяков Д.В. 115
Гец К.В. 92, 95, 96
Главный В.Г. 166
Глезер В.В. 75
Глушко Т.А. 141
Горбачев М.В. 214
Гордиенко М.Р. 161
Грибин В.Г. 60, 61
Гришин М.А. 147
Громов А.А. 120, 122
Губин В.Е. 121
Гувернюк С.В. 6
Гурьянов А.И. 116
Давлетшин И.А. 22, 35
Давыдов М.Н. 62, 141
Данильчик Е.С. 30
Двойнишников С.В 160
Двойнишников С.В. 156, 157, 159, 166, 167
Дедов А.В. 66, 81
Дееб Равад 23
Дектерев А.А. 144, 228
Дектерев А.А. 24
Дектерев Ар.А. 126
Делягин В.Н. 196
Дементьев Ю.А. 63, 184
Демидов А.С. 215
Демьянко К.В. 19
Деревич И.В. 5
Дехтярь Р.А. 94, 216
Диденко Д.В. 217
Диева Н.Н. 71
Домрина Е.С. 211
Дорофеев В.Л. 142
Дулин В.М. 126, 168
Дуников Д.О. 210, 218
Душин Н.С. 36
Евдокимов О.А. 20, 116
Егошина О.В. 219
Езендеева Д.П. 161
Елистратов Д.С. 220
Елистратов С.Л. 196
Жданов Р.К. 92, 95, 96
Железнов А.П. 221
Жестков М.Н. 217
Жилкин Б.П. 56
Заворин А.С. 222
Зайцев В.П. 104
Зайцев Д.В. 64, 76, 155, 179
Закс М.А. 21
Залкинд В.И. 65
Заноско А.И. 66
Зарафутдинов И.А. 138
Зарипов Д.И. 25
Зарипов Р.Р. 29
Захаренков А.В. 80, 81, 215
Звонарева С.К. 219
Зейгарник Ю.А. 65
Зенков А.В. 115
Зиканов О.Ю. 200
Зиннатуллин Р.Р. 195, 203
Ибраева К.Т. 222
Иванов Н.Г. 148
Иванов Н.С. 191
Иванова Я.Ф. 26
Ивочкин Ю.П. 67
Игрушкин С.И. 213
Ильин В.В. 80
Ильченко М.А. 27
Иногамов Н.А. 152
Иншаков С.И. 158, 159
Исаев С.А. 6
Исламова А.Г. 176
Исмаилов А.М. 67
Кабардин И.К. 159, 160, 161
Кабов О.А. 7
Кабов О.А. 76, 155
Кадчик Д.Ю. 130, 131
Кадыйров А.И. 28, 29
Казаков А.Н. 177, 183, 210
Какаулин С.В. 161
Калинин Е.И. 37
Калтаев А. Ж. 123
Кан В.В. 236
Кандауров А.А. 160
Караева Ю.В. 29
Карзанов А.Н. 196
Карлович Т.Б. 30
Карпов Д.И. 197
Карпов П.Н. 68
Картуесова А.Ю. 230
Кашинский О.Н. 59
Кашкарова М.В. 180
Киреев В.Н. 57
Кириловский С.В. 19
Климонов И.А. 161, 237
Клюев М.А. 37
Князева А.Г. 97
Кобелев А.М. 208
Ковалева Л. А. 203
Ковалева Л.А. 57, 86
Козлов А.Н. 117, 125
Козулин И.А. 69
Колесников А.Ф. 162
Колесников Ю.Б. 200
Комов А.Т. 80, 81
Кондаурова Л.П. 70
Кондратьев А.В. 163, 231
Кондратьева О.Е. 223
Конобеева Н.Н. 178
Копьев Е.П. 53
Коробейников С.М. 197
Королёв П.В. 87
Королева А.П. 31, 32
Королева М.Р. 224
Коростелева Е.Н. 97
Коротаев Г.К. 225

Коротаев Г.К. 229
Коротких А.Г. 118, 119, 132
Косой А.А. 182
Косой А.С. 209
Костогруд И.А. 175
Костогруд И.А. 187
Котов М.А. 143
Кочкин Д.Ю. 179
Кравцов Ю.В. 180
Кравцова А.Ю. 180
Кравченко М.Н. 71
Крайнов А.Ю. 128
Краснов Д.С. 200
Крылов В.С. 163, 221, 230, 231
Крюков А.П. 87
Кубриков К.Г. 67
Кудрявцева Е.Д. 158
Кузма-Кичта Ю.А. 112, 191
Кузнецов В.А. 103, 144
Кузнецов В.В. 69
Кузнецов В.В. 8
Кузнецов Г.В. 145, 226, 227
Кузнецов Д.В. 98
Кузьменков Н.В. 31
Кулик А.В. 99
Куликов Д.А. 213
Куликов Д.В. 167
Куперштох А.Л. 198
Куперштох А.Л. 199
Куприянов А.В. 72
Кусюмов А.Н. 33
Кусюмов С.А. 33
Лаврентьев С.Ю. 143
Лазебный Д.Б. 199
Ларионов К.Б. 120, 121, 122
Ларионов К.Б. 123
Левашов В.Ю. 124
Левин А.А. 125
Левченя А.М. 48, 148
Лемешев О.П. 196
Леонтьев Н.И. 213
Летушко В.Н. 109
Липнягов Е.В. 105
Листратов Я.И. 200
Литвинцев К.Ю. 228
Литвинцева А.А. 73, 85
Лишаев П.Н. 229
Лобанов П.Д. 237
Лобасов А.С 76
Лобасов А.С. 74, 126, 168
Логинова А.А. 211
Локтионов В.Д. 81, 215
Локтионов О.А. 223
Ломакина В.А. 49
Ломовский О.И. 181
Мажейко Н.А. 55, 56
Мазо А.Б. 37
Майорова А.И. 127
Макаров М.В. 137
Макаров М.С. 34, 100, 101
Макарова С.Н. 34, 100, 101
Максимов В.И. 145, 226
Маликов А.Г. 102
Мамонов В.Н. 164
Мамылов С.Г. 181
Марасанов Н.В. 75
Мариковская С.М. 75
Масленников Г.Е. 234
Маслов М.Г. 213
Мацкевич Н.И. 103, 104
Медведев Р.Н. 202
Меледин В.Г. 156, 159, 160, 161, 167
Мелешкин А.В. 75
Мешкова В.Д. 228
Мизюк А.И. 146, 229
Мильман О.О. 230, 231
Минаев С.С. 99
Минаков А.В. 74, 76, 144
Минко К.Б. 137
Мирнов С.В. 81
Миронова Н.Н. 75
Миськив Н.Б. 93, 164
Михайлов А.С. 116
Михайлов С.А. 33
Михеев А.Н. 35
Михеев Н.И. 6, 22, 35, 36
Мишаков И.В. 122
Моисеева К.М. 128
Мокрин С. Н. 99
Молодцов А.А. 72
Молочников В.М. 37
Морозкин О.Н. 72
Морозов А.В. 186, 235
Морозова М.А. 187
Мошаров В.Е. 159
Муллаянов А.И. 57
Мулляджанов Р.И. 40, 45
Мусин А.А. 57, 86
Нагорнова Т.А. 145, 226
Назаров А.Д. 68, 93, 164
Наумкин В.С. 38
Наумов И.В. 39
Наумов И.В. 42, 49
Немировский С.К. 9
Нечепуренко Ю.М. 19
Низамутдинов В.Р. 232
Низовский В.Л. 65
Низовский Л.В. 65, 209
Низовцев М.И 109
Никаноров О.Л. 217
Никущенко Д.В. 6
Овчинников В.В. 94, 216
Окулов В.Л. 49
Оришич А.М. 102
Орлова Е.Г. 77
Осин А.Б. 72
Осипов П.В. 234
Павленко А.Н. 98
Павлов В.А. 157, 159
Паерелий А.А. 37
Палкин Е.В. 40, 45
Панова А.А. 5
Паршакова М.А. 105
Пахолков В.В. 232
Пензик М.В. 117
Петрушин А.А. 221
Пильник А.А. 62, 111
Питюк Ю.А. 82, 138, 139, 151
Плотников Л.В. 56
Пономаренко Т.Г. 106, 190
Поплавская Т.В. 19
Поплавский С.В. 165
Попов В.В. 60, 61
Попов И.А. 6
Правдина М.Х. 161
Прокопенко Я.Г. 197
Прокопцов И.С. 232
Прохоров Д.А. 116
Птахин А.В. 163, 221, 230, 231
Пугачук А.С. 212, 233
Пузина О.С. 146, 229
Пузина Ю.Ю. 87
Радюк А.А. 98
Рамазанов Э.Р. 182
Рахманов В.В. 156, 166
Ридель А.В. 197
Рогожкин С.А. 217, 232
Родионов А.А. 108
Рожков А.Н. 201
Рожкова Е.И. 128
Романов И.А. 183
Романова Е.В. 33
Роньшин Ф.В. 58, 63, 85, 184
Росляков П.В. 223
Рудяк В.Я. 10
Рыжков А.Ф. 234
Рютин С.Б. 78, 107
Сабурова Е.А. 224
Саввинова Н.А. 147
Савенко Р.А. 202
Савченко И.В. 185
Савченко И.В. 189
Сагитов Р.В. 21
Садбаков О.Ю. 156
Сажин И.А. 79
Самойленко А.И. 159
Самошкин Д.А. 103, 104, 172
Сафаров А.С. 125
Сафонов А.И. 108
Сахипгареев А.Р. 186, 235
Свириденков А.А. 211
Свиридов Е.В. 200
Свищев Д.А. 117
Сейфельмлюкова Г.А. 112, 191
Селихова Е.А. 118, 119, 132
Семёнов Д.О. 166
Семенов Д.О. 167
Семерикова А.Н. 103, 104
Сендеров М.В. 41
Сергеев Д.А. 160
Сергеев М.Н. 20
Серов А.Ф. 68, 164
Сиденков Д.В. 23
Сидоров Р.С. 129
Скрипкин С.Г. 42
Скрипкина Т.С. 181
Скрипов П. 107
Скрипов П.В. 78

Слепцов С.Д. 147
Слюсарский К.В. 121, 123, 130, 131
Смирнов В.А. 213
Смирнов Е.М. 11
Смирнов Е.М. 26, 48, 148
Смирновский А.А. 148
Смовж Д.В. 175, 187
Сморчкова Ю.В. 80, 81
Соколова Е.И. 127
Солнышкина О.А. 149
Солнышкина О.А. 54, 188
Соловьев Н.Г. 143
Соловьёва Т.А. 238
Сон Э.Е. 12
Сорокин В.Д. 72
Сорокин И.В. 118, 119, 132
Станкус С.В. 103, 104, 171, 172, 173, 189
Старинский С.В. 108
Стерлягов А.Н. 109
Стояновская О.П. 141
Ступникова А.В. 150
Субботин О.С. 92, 95, 96
Судаков А.Г. 6
Султангужин Р.Ф. 195, 203
Сухих Л.И. 142
Сухоцкий А.Б. 30
Сюзаев А.И. 101
Табакаев Р.Б. 207, 236
Тарасенко А.Н. 211
Тепляков И.О. 67
Терентьев Д.И. 174, 208
Терехов В.В 93
Терехов В.В. 13, 43, 44
Терехов В.И. 13, 18, 38, 43, 68, 93, 214
Тихова В.Д. 181
Тищенко А.А. 60, 61
Тищенко В.А. 60, 61
Ткачев Е.Н. 103
Токарев М.П. 45
Толокольников А.А. 227
Толстогузов Р.В. 168
Третьяков Д.С. 10
Троицкая Ю.И. 160
Троцюк А.В. 133
Тупотилов И.А. 81, 215
Усов Э.В. 161, 237
Фазлетдинов С.У. 82
Фаткуллина Н.Б. 54, 188
Фатыхов Г.А. 71
Фахреева Р.Р. 82, 151
Федюшкин А.И. 46, 83
Феоктистов Д.В. 77
Филимонов М.Ю. 110
Филиппов М.В. 44
Фоминых Н.К. 233
Фортова С.В. 152
Французов М.С. 27, 31, 32
Хадзиабдич М. 40
Хазов Д.Е. 47
Хайрулин А.Р. 173, 189
Хайрулин Р.А. 171
Ханъялич К. 40
Цвелодуб О.Ю. 84
Цой М.А. 42
Чеверда В.В. 73, 85, 106, 190
Челебян О.Г. 211
Чередник И.В. 227
Чернов А.А. 62, 104, 111
Чернов В.А. 196
Чернова А.А. 17, 224
Чернявский А.Н. 98
Чикишев Л.М. 168
Чиннов Е.А. 63
Чохар И.А. 44
Чубов А.С. 157
Чугунков Д.В. 112, 191
Чудновский В.М. 99
Чумаков Ю.С. 48
Шадрин Е.Ю. 53
Шакиров Р.Р. 22, 36
Шараборин Д.К. 168
Шарифулин А.Н. 21, 150
Шарифуллин Б.Р. 39
Шарифуллин Б.Р. 49
Шатекова А.И. 64
Шемякин А.Н. 143
Шепелев В.В. 152
Шипов Д.Л. 72
Шишкова И.Н. 124
Шлегель В.Н. 104
Шлепкин А.С. 186, 235
Шмелев Е.И. 213
Штелинг В.С. 80
Штерн В.Н. 39
Штым К.А. 238
Шухов Ю.Г. 108
Щелоков С.Л. 162
Щербаков П.П. 80
Щигель С.С. 65
Элоян К.С. 85
Юлмухаметова Р.Р. 86
Юхнев А.Д. 26
Яворский Н.И. 161
Якимов М.Ю. 143
Якупова Л.В. 174
Янко П.Е. 180
Янковский С.А. 121, 227
Яньков Г.Г. 137
Ячевский И.А. 87

Ответственные за выпуск
к.ф.-м.н. М.С. Макаров

Вёрстка
А.В. Мартынец

Подписано в печать 24.08.2020 г. Печать офсетная.
Бумага офсетная. Формат 60×84 1/16. Усл. печ. л. 29.
Тираж 160 экз. Заказ № 106.

Отпечатано в типографии «Срочная полиграфия»
ИП Малыгин Алексей Михайлович
630090, Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 6, оф. 104
Тел. (383) 217-43-46, 8-913-922-19-07







Ждём встречи с Вами!









