

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ISSN 0021–3411

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ ФИЗИКА

IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

Том 66

Ноябрь, 2023

№ 11 (792)

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Основан в 1957 г.

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-84127 от 28 ноября 2022 г.
выдано Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций



Журнал входит в перечень рецензируемых научных журналов,
включенных в список ВАК, для публикации основных результатов
кандидатских и докторских диссертаций

Учредитель:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский
Томский государственный университет»

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Шеремет М.А., проф. (гл. редактор), Томск, Россия
Багров В.Г., проф. (зам. гл. редактора), Томск,
Россия
Козырев А.В., проф. (зам. гл. редактора), Томск,
Россия
Пермякова Л.В. (отв. секретарь), Томск, Россия
Алексеев С.В., акад. РАН, Новосибирск, Россия
Асеев А.Л., акад. РАН, Новосибирск, Россия
Борисов А.В., проф., Москва, Россия
Вараксин А.Ю., чл.-корр. РАН, Москва, Россия
Ворожцов А.Б., проф., Томск, Россия
Войцеховский А.В., проф., Томск, Россия
Гитман Д.М., проф., São Paulo, Бразилия
Демин В.А., проф., Пермь, Россия
Джафаров Р.Г., д.ф.-м.н., Баку, Азербайджан
Дитенберг И.А., д.ф.-м.н., Томск, Россия
Ивонин И.В., д.ф.-м.н., Томск, Россия
Казинский П.О., д.ф.-м.н., Томск, Россия
Кистенев Ю.В., проф., Томск, Россия
Ковалевская Т.А., проф., Томск, Россия
Колобов Ю.Р., проф., Белгород, Россия
Коротаев А.Д., проф., Томск, Россия
Майер Г.В., проф., Томск, Россия
Манка Оронцо, проф., Неаполь, Италия
Месяц Г.А., акад. РАН, Москва, Россия
Неклюдов И.М., акад. НАН Украины, Харьков
Озтоп Хакан, проф., Элязыг, Турция
Ратахин Н.А., акад. РАН, Томск, Россия
Сагхир Зиад, проф., Торонто, Канада
Саранин А.А., чл.-корр. РАН, Владивосток, Россия
Суржиков А.П., проф., Томск, Россия
Суханов Д.Я., д.ф.-м.н., Томск, Россия
Тао Вен-Куан, академик Китайской академии
наук, Сиань, Китай
Углов В.В., проф., Минск, Республика Беларусь
Ушаков В.Я., проф., Томск, Россия
Чайковская О.Н., д.ф.-м.н., Томск, Россия
Черепанов В.Н., д.ф.-м.н., Томск, Россия
Чумляков Ю.И., проф., Томск, Россия
Шаповалов А.В., проф., Томск, Россия
Шипилов С.Э., д.ф.-м.н., Томск, Россия

EDITORIAL BOARD

Sheremet M.A. (Editor-in-Chief), Professor, Tomsk, Russia
Bagrov V.G. (Deputy Editor-in-Chief), Professor, Tomsk,
Russia
Kozyrev A.V. (Deputy Editor-in-Chief), Professor,
Tomsk, Russia
Permyakova L.V. (Executive Editor), Tomsk, Russia
Alekseenko S.V., Academician RAS, Novosibirsk, Russia
Aseev A.L., Academician RAS, Novosibirsk, Russia
Borisov A.V., Professor, Moscow, Russia
Varaksin A.Y., Corr. Member RAS, Moscow, Russia
Vorozhtsov A.B., Professor, Tomsk, Russia
Voitsekhovskii A.V., Professor, Tomsk, Russia
Gitman D.M., Professor, São Paulo, Brazil
Demin V.A., Professor, Perm, Russia
Jafarov R.G., Professor, Baku, Republic of Azerbaijan
Ditenberg I.A., Professor, Tomsk, Russia
Ivonin I.V., Professor, Tomsk, Russia
Kazinski P.O., Professor, Tomsk, Russia
Kistenev Y.V., Professor, Tomsk, Russia
Kovalevskaya T.A., Professor, Tomsk, Russia
Kolobov Y.R., Professor, Belgorod, Russia
Korotaev A.D., Professor, Tomsk, Russia
Mayer G.V., Professor, Tomsk, Russia
Manca Oronzio, Professor, Naples, Italia
Mesyats G.A., Academician RAS, Moscow, Russia
Neklyudov I.M., Academician UAS, Kharkov, Ukraine
Oztop Hakan, Professor, Elazığ, Turkey
Ratakhin N.A., Academician RAS, Tomsk, Russia
Saghir Ziad, Professor, Toronto, Canada
Saranin A.A., Corr. Member RAS, Vladivostok, Russia
Surzhikov A.P., Professor, Tomsk, Russia
Sukhanov D.Y., Professor, Tomsk, Russia
Tao Wen-Quan, Academician of the Chinese Academy of
Sciences, Xi'an, China
Uglov V.V., Professor, Minsk, Republic of Belarus
Ushakov V.Ya., Professor, Tomsk, Russia
Tchaikovskaya O.N., Professor, Tomsk, Russia
Cherepanov V.N., Professor, Tomsk, Russia
Chumlyakov Y.I., Professor, Tomsk, Russia
Shapovalov A.V., Professor, Tomsk, Russia
Shipilov S.E., Professor, Tomsk, Russia

Журнал «Известия вузов. Физика» выходит 12 раз в год и распространяется по подписке. Подписной индекс 70380 в объединенном каталоге «Пресса России». Полные тексты статей доступны на сайте Научной электронной библиотеки: <https://elibrary.ru/contents.asp?titleid=7725>. Публикация статей в журнале – бесплатная.

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Адрес: 634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, д. 36

Телефон: +7(3822) 53-33-35, 78-37-02

Сайт: <http://journals.tsu.ru/physics/>

E-mail: physics@mail.tsu.ru

Актуальные вопросы развития теплофизики и ее применений в современных приложениях

ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК

Под редакцией
акад. РАН Д.М. Марковича, акад. РАН С.В. Алексеенко,
д.ф.-м.н. А.А. Морозова

СОДЕРЖАНИЕ

XXXIX Сибирский теплофизический семинар	5
Анисимова М.А., Князева А.Г., Коростелева Е.Н., Николаев И.О. Фазообразование при синтезе композита в условиях реакционного спекания из смеси порошков $Ti+Al+Fe_2O_3+(Fe+C)$	7
Долгих В.Д., Кудинов В.А., Беляков Н.Р. Исследование тепловых характеристик пиролитического реактора генерации водорода из метана.....	17
Жигарев В.А., Гузей Д.В., Лысакова Е.И., Скоробогатова А.Д., Минаков А.В. Расчетное исследование влияния добавки наноматериалов в буровой раствор на эффективность выноса из горизонтальной скважины.....	26
Крюков А.П., Пузина Ю.Ю., Жаховский В.В., Левашов В.Ю., Майоров В.О. Процессы переноса на межфазных поверхностях конденсат – пар: достижения и проблемы.....	35
Кудинов В.А., Трубицын К.В., Котова Е.В., Гаврилова Т.Е. Аналитические решения уравнений динамического пограничного слоя при переменной вязкости.....	46
Кудинов В.А., Трубицын К.В., Котова Е.В., Стефанюк Е.В., Гаврилова Т.Е. Формирование пограничного слоя при разгонном течении Куэтта с учетом пространственно-временной нелокальности.....	52
Кутуев Р.А. Молярная поверхность и толщина поверхностного слоя трехкомпонентных расплавов.....	61
Лаврухин А.А., Делов М.И., Кузьменков Д.М., Куценко К.В. Влияние темпа нарастания тепловой нагрузки на кривую кипения насыщенного азота.....	69
Лебезов А.А., Морозов А.В., Сахипгареев А.Р., Шлепкин А.С. Экспериментальное исследование теплофизических свойств растворов борной кислоты с учетом особенностей водно-химического режима ВВЭР.....	78
Лепешкин А.Р., Иванов В.Е., Гуанхуа Ч. Исследование нагрева вращающихся дисков и цилиндрических заготовок в электромагнитном поле магнитов и сверхпроводниковых индукторов.....	86
Молочников В.М., Мазо А.Б., Калинин Е.И., Пашкова Н.Д., Никифоров И.В. Гемодинамические аспекты проблемы увеличения срока службы сосудистых трансплантатов.....	94
Мордовской А.С., Шамирзаев А.С., Кузнецов В.В. Сравнение эффективности микроканальных и микроструйных систем для охлаждения теплонапряженного оборудования.....	109
Пашин А.В., Крюков Ю.А., Кудинов В.А. Исследование двухтемпературной модели теплообмена в плазме.....	118
Пискунов М.В., Фёдоров В.С., Ашихмин А.Е., Пискунова А.Е., Мельник Е.Ю., Больбасов Е.Н. Влияние проникновения жидкости в пористый нановолокнистый материал с варьируемой смачиваемостью при соударении с ним капли с частицами микрогеля.....	127
Плотников Л.В., Шурупов В.А., Следнев В.А., Давыдов Д.А., Красильников Д.Н. Стационарная газодинамика и теплообмен турбулентных потоков в подающих системах разных конфигураций с клапанным механизмом.....	137
Ушаков К.Ю., Горина В.З., Богомолов А.Р. Характеристики твердого остатка процесса газификации резинотехнических изделий.....	144
Филимонов С.А., Гаврилов А.А., Фрик П.Г., Сухановский А.Н., Васильев А.Ю. Моделирование движения погруженной пластины в развитом свободно-конвективном слое.....	151
Фомин П.А., Троцюк А.В., Тетервова И.В. Моделирование детонационного горения двухтопливной газовой смеси углеводорода с водородом.....	157
Шебелева А.А., Минаков А.В., Пряжников М.И., Шебелев А.В., Пряжников А.И. Экспериментальное исследование влияния наночастиц оксида кремния на режимы двухфазного течения в Y-образном микроканале.....	168

Current issues in the development of thermophysics and its use in modern applications

THEMATIC ISSUE

Edited by
Academician of the RAS **D.M. Markovich**, Academician of the RAS **S.V. Alekseenko**,
Doctor of Physical and Mathematical Sciences **A.A. Morozov**

CONTENTS

XXXIX Siberian Thermophysical Seminar	5
Anisimova M.A., Knyazeva A.G., Korosteleva E.N., Nikolaev I.O. Phase formation during composite synthesis under conditions of reactive sintering of the Ti+Al+Fe ₂ O ₃ +(Fe+C) powder mixture	7
Dolgikh V.D., Kudinov V.A., Belyakov N.R. Investigation of thermal characteristics of pyrolytic reactor for producing hydrogen from methane	17
Zhigarev V.A., Guzei D.V., Lysakova E.I., Skorobogatova A.D., Minakov A.V. Computational investigation of the influence of additive of nanomaterials to drilling fluid on the efficiency of recovery from a horizontal well.....	26
Kryukov A.P., Puzina Yu.Yu., Zhakhovsky V.V., Levashov V.Yu., Mayorov V.O. Transfer processes on interfacial surfaces of condensate – vapor: achievements and challenges	35
Kudinov V.A., Trubitsyn K.V., Kotova E.V., Gavrilova T.E. Analytical solutions of dynamic boundary layer equations with variable viscosity	46
Kudinov V.A., Trubitsyn K.V., Kotova E.V., Stefanyuk E.V., Gavrilova T.E. Formation of a boundary layer during accelerating Couette flow taken into account of spatio-temporal non-locality.....	52
Kutuev R.A. Molar surface and thickness of the surface layer of three-component melts.....	61
Lavrukhin A.A., Delov M.I., Kuzmenkov D.M., Kutsenko K.V. The boiling curve alteration depending on the rate of heat load increase	69
Lebezov A.A., Morozov A.V., Sakhigareev A.R., Shlepkov A.S. Experimental investigation of thermophysical properties of boric acid solutions taking into account the features of the water chemistry regime of VVER.....	78
Lepeshkin A.R., Ivanov V.E., Guanghua Z. Investigation of heating of rotating disks and cylindrical workpieces in the electromagnetic field of magnets and superconducting inductors	86
Molochnikov V.M., Mazo A.B., Kalinin E.I., Pashkova N.D., Nikiforov I.V. Hemodynamic aspects of vascular graft life-span prolongation	94
Mordovskoy A.S., Shamirzaev A.S., Kuznetsov V.V. Comparison of the efficiency of microchannel and microjet systems for cooling thermo-stressed equipment.....	109
Pashin A.V., Kryukov Y.A., Kudinov V.A. Research of the two-temperature model of heat transfer in plasma	118
Piskunov M.V., Fedorov V.S., Ashikhmin A.E., Piskunova A.E., Melnik E.Y., Bolbasov E.N. Effect of liquid impalement into a porous nanofiber material with variable wettability when a drop with microgel particles collides with it	127
Plotnikov L.V., Shurupov V.A., Slednev V.A., Davydov D.A., Krasilnikov D.N. Stationary gas dynamics and heat transfer of turbulent flows in supply systems of various configurations with a valve mechanism	137
Ushakov K.Yu., Gorina V.Z., Bogomolov A.R. Characteristics of the solid residue of the gasification process of rubber products.....	144
Filimonov S.A., Gavrilov A.A., Frick P.G., Sukhanovskii A.N., Vasiliev A.Y. Modeling of motion of submerged plate in a thermal convective layer	151
Fomin P.A., Trotsyuk A.V., Tetervova I.V. Modeling of detonation combustion of a dual-fuel gas mixture	157
Shebeleva A.A., Minakov A.V., Pryazhnikov M.I., Shebelev A.V., Pryazhnikov A.I. Experimental study of the effect of silicon oxide nanoparticles on two-phase flow regimes in a Y-microchannel.....	168

XXXIX СИБИРСКИЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ СЕМИНАР

Традиционный семинар на базе Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН в этом году проходил в Новосибирском национальном исследовательском государственном университете и был посвящен 90-летию академика Алексея Кузьмича Реброва.

Алексей Кузьмич Ребров – выдающийся ученый в области физической газодинамики, динамики разреженных газов, теплофизики и вакуумной техники.

Родился 30 июля 1933 г. В 1955 г. окончил Харьковский авиационный институт, в 1960 г. – аспирантуру при Казанском авиационном институте. С 1961 г. работает в новосибирском Институте теплофизики. Кандидат технических наук (1962 г.), тема диссертации: «Исследование теплообмена в разреженном пространстве». С 1966 г. заведующий лабораторией разреженных газов. Доктор физико-математических наук (1972 г.), тема диссертации: «Исследование расширения газа в среду низкой плотности». В 1990 г. избран членом-корреспондентом АН СССР по Отделению проблем машиностроения, механики и процессов управления. В 2000 г. избран академиком РАН.

Основные результаты А.К. Реброва были получены в исследованиях газодинамики струй низкой плотности, в области физики релаксационных процессов при расширении газов в вакууме, газодинамики сверхвысоковакуумных диффузионных насосов, физики кластеров. Благодаря научной деятельности А.К. Реброва Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН стал одним из ведущих исследовательских центров по динамике разреженных газов. Созданные в Институте вакуумные газодинамические камеры и соответствующие методы диагностики потоков в них (электронно- и молекулярнопучковые, масс-спектрометрический, лазерные и т.д.) послужили началом нового поколения экспериментальных установок в стране, а сверхзвуковые струи, сохраняя свое прикладное ракетно-космическое значение, стали общепризнанным объектом для проведения исследований неравновесных физико-химических явлений (поступательная, вращательная и колебательная релаксация, кинетика конденсации, генерация и свойства кластеров, излучение и т.д.). В последние годы Алексей Кузьмич основное внимание уделяет разработке перспективных методов газоструйного нанесения наноразмерных алмазных, фторполимерных и металлополимерных покрытий.

Под его руководством подготовлено 32 кандидата наук, 13 из них стали докторами наук, один – академиком.

Организатор Международного симпозиума по динамике разреженных газов в России в 1982 и 2006 гг., а также ряда всесоюзных и российских конференций. В 2018 г. в Институте теплофизики СО РАН была проведена конференция «XXXIV Сибирский теплофизический семинар», посвященная 85-летию академика А.К. Реброва.

Член международного совещательного комитета симпозиума по динамике разреженных газов, член Российского Национального комитета по теоретической и прикладной механике, член Российского вакуумного общества. Заместитель главного редактора журнала «ПМТФ».

В этом году тематика XXXIX Сибирского теплофизического семинара была разделена на 10 секций, охватывающих следующие научные направления: процессы в разреженных газах и плазме, газофазный синтез наноструктур; конвективные течения и теплообмен в однофазных средах; методы управления турбулентностью и интенсификация теплопереноса; гидродинамика, теплообмен и волновые процессы в многофазных средах; теплообмен при фазовых переходах; процессы переноса при физико-химических превращениях, включая горение; теплофизические проблемы энергетики, энергоэффективность и энергосбережение; теплофизика микро- и наносистем; теплофизические свойства веществ и лучистый теплообмен; фундаментальные основы расчета и принципов построения энергетических систем, основанных на эффекте сверхпроводимости.





В рамках конференции было прочитано 14 пленарных лекций ведущими учеными России и мира, посвященных актуальным вопросам развития теплофизики и ее применений в современных приложениях. Помимо устных выступлений были проведены три постерные сессии, на которых участники семинара могли более тесно пообщаться с авторами интересующих их докладов. Всего на конференции было представлено 325 докладов, в том числе 202 устных и 123 стендовых. Общее количество участников конференции составило 285 человек. Ученые и специалисты представляли 49 научных организаций (из них 16 – академические институты) из Алматы (Казахстан) и Новосибирска, Москвы, Томска, Красноярска, Санкт-Петербурга, Екатеринбурга, Казани, Улан-Удэ и других городов России. Стоит отметить, что примерно треть участников XXXIX Сибирского теплофизического семинара являлись молодыми учеными, лучшие доклады которых были отмечены дипломами различной степени.

Организаторами семинара стали Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Сибирское отделение РАН, Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН, Российский национальный комитет по теплообмену.

Наиболее интересные и значимые работы были включены в данный тематический номер журнала «Известия вузов. Физика» под названием «Актуальные вопросы развития теплофизики и ее применений в современных приложениях».

Оргкомитет СТС-39

Фазообразование при синтезе композита в условиях реакционного спекания из смеси порошков $Ti+Al+Fe_2O_3+(Fe+C)^*$

М.А. Анисимова¹, А.Г. Князева¹, Е.Н. Коростелева¹, И.О. Николаев¹

¹ *Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия*

Представлены данные экспериментальных исследований по спеканию стружки стали 45 (содержащей оксид железа) с порошками титана и алюминия. Система представляет собой сложный многокомпонентный состав, содержащий элементы Ti–Al–Fe–O–C, где источником кислорода является стальная стружка после соответствующей дополнительной обработки. Показано, что при спекании смеси порошков преимущественно формируется неравновесный твердый раствор на основе α -Ti, где частично растворился алюминий. Другая часть алюминия ушла на формирование неравновесной фазы $AlFe_2$. Несмотря на присутствие Fe_2O_3 в исходном состоянии стружки, после реакционного спекания ее смеси с титаном и алюминием следов оксидов Fe_2O_3 и Al_2O_3 не обнаружено. Предложена диффузионно-кинетическая модель формирования фазового состава в процессе реакционного спекания смеси порошков $Ti+Al+Fe_2O_3$, учитывающая конкуренцию между реакциями образования интерметаллидов и восстановления железа. Получено ее приближенное аналитическое решение, позволяющее оценивать относительные доли продуктов синтеза в зависимости от начального состава прессовки.

Ключевые слова: *металломатричные композиты, реакционное спекание, пористость, структура, фазовый состав, диффузионно-кинетическая модель.*

Введение

Современные производственные процессы неразрывно связаны с использованием новых типов материалов или совершенствованием известных сплавов и композитов. Кроме традиционных металлов и сплавов, большой интерес вызывают сложные многокомпонентные композиционные материалы на основе титана и алюминия [1, 2]. Они широко исследуются из-за своих привлекательных физико-химических и механических свойств. Использование многокомпонентных порошковых смесей с взаимодействующими элементами в процессе реакционного спекания обеспечивает получение металломатричных композитов, которые могут включать соединения разного типа с соответствующими структурой и свойствами [3, 4]. Это дает возможность сформировать уникальные свойства материалов и в перспективе разработать соответствующие технологии. Наиболее интересной и актуальной в этом направлении является попытка применения в многокомпонентных смесях переработанных отходов или побочных продуктов металлообработки (металлическая стружка) машиностроительных предприятий [5, 6]. Поскольку чаще всего для деталей используются заготовки из различных марок стали, то преимущественный объем отходов будет составлять стальная стружка. С другой стороны, стальную стружку можно рассматривать как самостоятельный материальный ресурс, который можно использовать в другом качестве, а не только в переплавке стальной шихты [7]. Во-первых, стальная стружка представляет собой уже отличный по структуре от исходной заготовки материал со своей сформированной в результате резания дефектной структурой, которая оказывает существенное влияние на диффузионные процессы. Во-вторых, большое значение имеют возможное влияние среды обработки с охлаждающей жидкостью, окислительные процессы, дополнительные загрязнения органикой с углеродной составляющей и т.п. В-третьих, стружка представляет собой высоко-активированный материал, который можно подвергнуть дальнейшему измельчению, доокислению и довести до порошкообразного вида. Это делает стальную стружку удобным сырьем для приготовления порошковых композиций с определенным сочетанием компонентов [8]. В частности, активно изучается группа композиционных материалов на основе титана с различными тугоплавкими добавками из соединений карбидов, нитридов, боридов, силицидов и оксидов [9, 10]. Перспективы их использования весьма разнообразны, включают широкий спектр отраслей и производств. Причем могут быть востребованы материалы как плотные с низкой остаточной пористостью, так и пористые с разветвленной поровой структурой. В этой связи порошок из стальной стружки может представлять интерес как перспек-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда и субсидии Администрации Томской области, грант № 22-13-20031, <https://rscf.ru/project/22-13-20031/>.

Исследование тепловых характеристик пиролитического реактора генерации водорода из метана*

В.Д. Долгих¹, В.А. Кудинов¹, Н.Р. Беляков¹

¹ Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

Разработана методика теплового расчета газофазного реактора термического разложения (пиролиза) метана для получения водорода, изготовленного в Самарском государственном техническом университете. При заданных геометрических размерах установки нагрева метана, температуре среды внутри реактора и уходящих газов выполнены расчеты следующих параметров: скорость и расход метана в реакторе и количество теплоты, затрачиваемой на его нагрев до температуры пиролиза; общее количество затрачиваемой теплоты с учетом потерь через изоляцию и с уходящими газами; расход топлива; коэффициент полезного действия установки.

Ключевые слова: газовый реактор пиролиза метана, получение водорода, тепловой баланс, расход топлива, коэффициент полезного действия, тепловая мощность установки пиролиза.

Введение

Водород, представляющий ценное химическое сырье, может быть использован как экологически чистое топливо. Для его промышленного получения применяются следующие способы: электролиз воды, паровая конверсия метана (химическая реакция метана с водяным паром); газификация угля (химическая реакция угля с водяным паром и кислородом – парокислородная конверсия) [1, 2]. Однако для получения водорода с использованием всех перечисленных методов требуется слишком много энергии и к тому же при паровой конверсии метана и газификации угля побочным продуктом является углекислый газ, выбросы которого в атмосферу должны быть ограничены. Следовательно, необходимо использовать какие-то другие экологичные и менее энергозатратные способы получения водорода. К их числу относится способ получения водорода из метана посредством его пиролиза [3–9]. Однако в случае использования в качестве источника теплоты различных электрических нагревателей, получающих электроэнергию от тепловых электрических станций, нужно принимать во внимание сопутствующие производству электроэнергии выбросы различных окислов углерода в окружающую среду. Для снижения углеродного следа необходима разработка новых конструкций пиролитических установок, использующих в качестве топлива генерируемую в реакторе метано-водородную смесь. Для создания таких установок требуется разработка методики расчета и определение таких параметров, как скорость и расход газа, количество теплоты, затрачиваемой на его нагрев и пиролиз, потери теплоты через изоляцию, потери с уходящими газами и др. В настоящей работе дана расчетная методика и конструкция реактора производства водорода из углеводородного сырья, в которой часть продуцируемой метано-водородной смеси используется в качестве топлива в горелочных устройствах реактора.

1. Конструкция установки

Нагрев метана до температуры пиролиза осуществляется в специально изготовленной установке (рис. 1), использующей в качестве топлива метан или часть водорода, полученного в процессе пиролиза. Использование водорода в качестве топлива для нагрева метана с целью его термического разложения позволяет организовать процесс получения водорода при полном отсутствии выбросов углекислого газа в окружающую среду.

Установка получения водорода путем пиролиза метана в реакторе с газовым нагревом включает (рис. 2): 1 – реактор пиролиза метана, в котором происходит нагрев метана до температуры 600–1100 °С (в зависимости от эффективности применяемых катализаторов) и его разложение на водород и углерод; 2 – газовая печь, служащая для нагрева реактора 1 путем факельного сжигания метана или части водорода, полученного на выходе (реактор не находится в топочном пространстве печи – между ее стенкой и стенкой реактора имеется воздушный зазор); 3 – тепловая изоляция

* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSSE-2023-0003) в рамках государственного задания Самарского государственного технического университета.

Расчетное исследование влияния добавки наноматериалов в буровой раствор на эффективность выноса из горизонтальной скважины*

В.А. Жигарев¹, Д.В. Гузей^{1,2}, Е.И. Лысакова^{1,2}, А.Д. Скоробогатова¹, А.В. Минаков^{1,2}

¹ Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

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

Проведено расчетное исследование влияния добавок наночастиц различного состава и размера в растворы на углеводородной основе на эффективность выноса шлама из горизонтальной и наклонной скважины. Были рассмотрены наночастицы оксидов кремния, нановолокна оксида алюминия и одностенные углеродные нанотрубки. Базовый буровой раствор на углеводородной основе представляет собой обратную эмульсию. Исследовано наиболее типичное для буровых растворов соотношение углеводородной фазы и воды равное 65/35. Концентрация добавок наноматериалов в буровых растворах варьировалась от 0.01 до 2 мас.%. Впервые выполнено систематическое исследование влияния состава и концентрации наночастиц, а также значения угла наклона скважины к горизонту на эффективность транспорта шлама буровыми углеводородными эмульсиями, модифицированными наноматериалами.

Ключевые слова: математическое моделирование, буровой раствор на углеводородной основе, наночастицы, одностенные углеродные нанотрубки, реология, транспорт шлама.

Введение

В настоящее время происходит увеличение потребления углеводородного сырья топливно-энергетическим комплексом. В среднем, по различным оценкам, прогнозируется рост спроса на нефть до 2040 г., после чего вероятно лишь постепенное, медленное его снижение в связи с увеличением доли альтернативной энергетики [1]. При росте спроса на углеводородное сырье возникает необходимость вовлечения в добычу новых углеводородных месторождений или интенсификации разработки уже осваиваемых. Большая часть легкодоступных и простых для разработки месторождений исчерпала свой потенциал, из-за чего нефтегазовым компаниям приходится заниматься разведкой новых месторождений, искать способы интенсификации на старых и возвращаться к ранее открытым, но не используемым по причинам нерентабельности или технической невозможности освоения. Одним из направлений совершенствования добычи углеводородов является совершенствование технологий бурения скважин. Неэффективный транспорт частиц выбуренной породы (шлама) в скважине является одной из основных причин низкой эффективности процесса бурения. Для горизонтальных участков скважин проблема транспортировки бурового шлама стоит особенно остро, поскольку частицы оседают на нижней стенке скважины, образуя так называемую шламовую подушку, наличие которой создает высокую опасность возникновения дифференциальных прихватов, повышает вероятность аварий и в целом затрудняет процесс промывки скважины.

Одним из способов повышения эффективности очистки скважины от выбуренной породы является использование буровых растворов с улучшенными реологическими свойствами. Для улучшения свойств буровых растворов в последнее время стали активно применяться добавки различных наночастиц. Данные исследования в настоящее время активно развиваются. В работе [2] показано, что добавка наночастиц оксида цинка в концентрациях от 0.05 до 2 мас.% позволяет улучшить реологические свойства бурового раствора при различных температурах. Так, при концентрации этих наночастиц, равной всего 0.1 мас.%, предел текучести увеличился на 62%, статическое напряжение сдвига – на 125% по сравнению с базовым раствором. В работе [3] исследовано влияние добавки наночастиц $ZnTiO_3$ на реологические свойства бурового раствора на водной основе. Результаты показали, что добавление 1 мас.% наночастиц позволяет повысить вязкость бурового раствора на 34.88% и снизить водоотдачу на 8%. Наиболее часто для улучшения свойств буровых растворов используют самые дешевые на сегодняшний день наночастицы диоксида кремния. Тем не менее, как показали авторы работы [4], добавка наночастиц SiO_2 при концентрации 2.57 мас.% повышает эффективную вязкость и предел текучести бурового раствора на водной основе более чем на 50%. Улучшение реологических свойств способствует лучшей промывке скважины от шлама. В работе [5] было установлено, что при добавке в буровой раствор наноча-

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-30022, <https://rscf.ru/project/23-79-30022/>.

Процессы переноса на межфазных поверхностях конденсат – пар: достижения и проблемы*

А.П. Крюков¹, Ю.Ю. Пузина¹, В.В. Жаховский^{2,3}, В.Ю. Левашов², В.О. Майоров^{1,2}

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

³ Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, г. Москва, Россия

Рассматривается несколько задач, связанных с процессами переноса на межфазных поверхностях. Исследуется эволюция пленки пара на поверхности шарового нагревателя с учетом неравновесных эффектов на границе раздела жидкость – пар. Описание таких процессов уже не может осуществляться только в рамках механики сплошной среды, а должно сопровождаться решениями соответствующих кинетических уравнений, свободных от ограничений по степени неравновесности. Методами молекулярной динамики выясняется механизм формирования самой паровой фазы на греющей поверхности для высокотеплопроводной среды, моделирующей сверхтекучий гелий (гелий II). Совместное применение классической теории гомогенной нуклеации и молекулярно-кинетической теории позволяет получить оценки степени влияния объемной конденсации на интенсивность испарения с поверхности.

Ключевые слова: гелий II, паровая пленка, межфазная поверхность, процессы переноса, молекулярная динамика, гомогенная конденсация, молекулярно-кинетическая теория, динамика границы раздела фаз.

Введение

Общеизвестно, что процессы испарения, конденсации и кипения активно используются в различных областях техники, что обуславливает актуальность их изучения. История и основные итоги изучения явлений переноса на границах раздела фаз пар – жидкость достаточно подробно изложены в работе [1], опубликованной в начале 2021 г., поэтому в настоящей работе представлены проведенные авторами за последние два года исследования различных межфазных процессов. Рассматриваются три задачи.

В первой из них анализируется динамика границы раздела фаз при пленочном кипении, для которого теплоперенос от греющей поверхности через пар к конденсированной фазе в ряде случаев происходит при сильно неравновесных условиях, что обуславливает необходимость применения методов молекулярно-кинетической теории (МКТ). Представлено соответствующее математическое описание, учитывающее кинетические особенности процессов переноса, и полученные на его основе результаты решения для сверхтекучего гелия.

Во второй задаче методами молекулярной динамики (МД) исследуется механизм формирования паровых образований при кипении гелия II, имеющего непосредственное отношение к определению величины максимального удельного теплового потока при кипении, так называемой первой критической плотности, что необходимо для разработки различных теплотехнических и криогенных устройств, поскольку это значение определяет верхний предел тепловых нагрузок при их эксплуатации. Многочисленные эксперименты со сверхтекучим гелием показали, что в этой жидкости отсутствует пузырьковый режим кипения, и при увеличении тепловой нагрузки до определенной величины сразу после непосредственного контакта нагревателя с гелием II наступает стадия пленочного кипения. Следовательно, применение общеизвестного подхода, который базируется на описании устойчивости границы раздела фаз жидкость – пар (парожидкостная смесь) при переходе от пузырькового кипения к пленочному, становится неоправданным.

В третьей задаче рассматривается влияние объемной конденсации на характеристики испарения. Рядом исследователей было показано, что образующийся при испарении пар пересыщен, причем вблизи предельной интенсивности весьма значительно, что обуславливает возможность конденсации в потоке движущегося пара. Путем объединения результатов кинетических решений задач испарения и классической теории гомогенной нуклеации получены результаты, позволяющие количественно оценивать рассматриваемое влияние для различных веществ.

* Анализ процессов теплопереноса на межфазных поверхностях гелий II – пар выполнен в рамках проекта РФФ № 23-29-00342, исследование процессов объемной конденсации выполнено при работе над проектом РФФ № 22-19-00044.

Аналитические решения уравнений динамического пограничного слоя при переменной вязкости*

В.А. Кудинов¹, К.В. Трубицын¹, Е.В. Котова¹, Т.Е. Гаврилова¹

¹ Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

Получено интегральное уравнение динамического пограничного слоя при переменной в поперечном направлении вязкости. Принято линейное изменение вязкости при максимальном ее значении на стенке и минимальном на границе пограничного слоя. Исследования приближенного аналитического решения, полученного на основе использования дополнительных граничных условий, позволили заключить, что изотакхи (линии одинаковых скоростей) в каждом сечении продольной координаты на начальном участке пограничного слоя расположены перпендикулярно неподвижной стенке, т.е. параллельно поперечной координате. Так как скорость движущейся среды на стенке равна нулю (условие прилипания), то, следовательно, пограничный слой формируется лишь на некотором расстоянии от стенки, в пределах которого скорость равна нулю.

Ключевые слова: динамический пограничный слой, переменная вязкость, интегральное уравнение, дополнительные граничные условия, приближенное аналитическое решение.

При течении жидкости (сжимаемой или несжимаемой) относительно неподвижной стенки возникает динамический пограничный слой, в пределах которого скорость изменяется от нуля на стенке до скорости невозмущенного потока. Его образование связано с движением фронта динамического возмущения. Переменность вязкости в пределах динамического пограничного слоя может быть обусловлена многими причинами – различными температурами стенки и набегающего потока, нагревом жидкости, вследствие различных скоростей течения по ширине пограничного слоя и проч. [1–8]. В настоящей работе рассматривается линейное изменение вязкости вне зависимости от причин, ее вызвавших.

Математическая постановка задачи распределения скорости в динамическом пограничном слое при переменной в поперечном направлении вязкости имеет вид

$$V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu(y) \frac{\partial V_y}{\partial y} \right], \quad (1)$$

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0, \quad (2)$$

$$V_x \Big|_{y=0} = 0, \quad (3)$$

$$V_y \Big|_{y=0} = 0, \quad (4)$$

$$V_x \Big|_{y=\delta(x)} = V, \quad (5)$$

$$\left(\frac{\partial V_x}{\partial y} \right)_{y=\delta(x)} = 0, \quad (6)$$

где V_x, V_y – скорости по координатным осям x и y ; x, y – продольная и поперечная координаты; $\nu(y)$ – кинематическая вязкость; $\delta(x)$ – толщина динамического пограничного слоя; $V = \text{const}$ – скорость невозмущенного потока.

Соотношения (1), (2) представляют уравнение Навье – Стокса и неразрывности потока уравнений (1), (2) по переменной и приводят к следующему интегральному уравнению:

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_0^{\delta(x)} (V_x - V) V_x dy = - \int_0^{\delta(x)} \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu(y) \frac{\partial V_y}{\partial y} \right] dy. \quad (7)$$

* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSSE-2023-0003) в рамках государственного задания Самарского государственного технического университета.

Формирование пограничного слоя при разгонном течении Куэтта с учетом пространственно-временной нелокальности*

В.А. Кудинов¹, К.В. Трубицын¹, Е.В. Котова¹, Е.В. Стефанюк¹, Т.Е. Гаврилова¹

¹ Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

С помощью модифицированной формулы закона Ньютона, учитывающей запаздывание во времени касательного напряжения и градиента скорости, получено нелокальное уравнение Навье – Стокса, учитывающее конечную скорость распространения импульса. Исследование его точно аналитического решения позволило заключить, что распределение скорости определяется величиной безразмерного коэффициента релаксации Fo_p . При малых его значениях условие прилипания частиц среды к стенке (граничное условие первого рода) реализуется не мгновенно, а в течение некоторого диапазона времени. С увеличением Fo_p происходит баллистический перенос импульса, при котором граничное условие первого рода принимается лишь по истечении всего времени нестационарного процесса.

Ключевые слова: течение Куэтта, нелокальное уравнение Навье – Стокса, точное аналитическое решение, пространственно-временная нелокальность, баллистический перенос импульса, коэффициент релаксации.

Вывод параболических уравнений переноса тепла, массы, импульса и проч. основан на принципах локального равновесия и сплошности среды. Согласно им, в любом элементе среды, сравнимом с длиной свободного пробега носителей энергии, имеет место локальное равновесие, хотя в целом система неравновесна. Допущение локального равновесия возможно лишь, когда скорость изменения макропараметров (за счет внешних воздействий) намного меньше скорости релаксации к локальному равновесию [1, 2]. Принимая этот принцип, в интегральных законах сохранения выполняется предельный переход и получаются уравнения переноса в дифференциальной форме. Такой подход физически некорректен, так как молекулярно-атомное строение среды несовместимо с гипотезой сплошности. Однако, когда характерный микромасштаб и время релаксации системы к равновесному состоянию значительно меньше характерного макромасштаба и всего времени течения процесса, то получаемые на основе указанных принципов дифференциальные уравнения будут локальными и по пространству, и по времени. Таким путем получают параболические уравнения переноса. Они не включают время релаксации и характерный масштаб микроструктуры (длину свободного пробега микрочастиц). Поэтому параболические уравнения не могут быть использованы для значений независимых переменных, сопоставимых со временем и длиной свободного пробега носителей энергии, ввиду неадекватного описания реальных физических процессов в указанных диапазонах изменения пространственно-временных переменных. Рассмотрение характерных пространственно-временных масштабов определяет две скорости процесса переноса: линейную скорость изменения параметров, вызванную неоднородными граничными условиями (скорость перемещения изотерм, изотак и проч.); скорость распространения возмущений (теплоты, импульса и проч.), не зависящую от граничных условий (внутренняя характеристика системы). Следовательно, бесконечная скорость распространения возмущений, описываемая решениями параболических уравнений, связана с принятием времени релаксации, равным нулю, что эквивалентно принятию допущения о мгновенном распространении возмущения. Для учета его конечной скорости необходима разработка математической теории процессов переноса, протекающих в локально-неравновесных условиях. Ее разработке посвящены исследования многих авторов, рассмотревших различные теории локально-неравновесных систем [1–12].

Изучение разгонных течений (возникающих из состояния покоя) позволяет выполнять исследование формирования пограничного слоя на стенке, которая движется в неподвижной среде. Такое течение наблюдается в случае, когда на некотором расстоянии от движущейся стенки находится параллельная ей неподвижная стенка. Математическая постановка задачи Куэтта имеет вид [10, 13, 14]

* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSSE-2023-0003) в рамках государственного задания Самарского государственного технического университета.

Молярная поверхность и толщина поверхностного слоя трехкомпонентных расплавов

Р.А. Кутуев^{1,2}

¹ Чеченский государственный университет им. А.А. Кадырова, г. Грозный, Россия

² Комплексный НИИ РАН им. Х.И. Ибрагимова, г. Грозный, Россия

Получены системы уравнений и на этой основе разработан метод определения термодинамических свойств поверхности (молярная площадь, состав и толщина поверхностного слоя (ПС)) трехкомпонентных систем расплав – насыщенный пар по концентрационной зависимости поверхностного натяжения. В рамках модели поверхностного слоя, в которой плотность поверхностного слоя принята равной 95% плотности расплава, по разработанному методу определены изотермы молярной поверхности и толщины ПС тройных расплавов In–Sb–Pb. Выявлено, что изотермы исследуемых свойств при изменении состава расплава по лучевым разрезам представляют собой гладкие кривые без экстремумов. Результаты расчетов показали, что на концентрационную зависимость молярной поверхности и толщины ПС оказывают существенное влияние адсорбционные процессы в расплавах. Выявлено, что с увеличением в расплавах содержания поверхностно-активного свинца (при изменении состава по разрезам $X_{In} : X_{Sn} = 3:1$ и $9:1$) адсорбция олова уменьшается и, проходя через нулевое значение, становится отрицательной, т.е. обнаружено явление подавления положительной адсорбции олова атомами более поверхностно-активного свинца.

Ключевые слова: *поверхностное натяжение, молярная поверхность, толщина поверхностного слоя, многокомпонентные расплавы, расплавы индий – олово, поверхностные свойства тройных систем.*

Введение

В последние годы заметно активизировались теоретические и экспериментальные исследования поверхностных свойств многокомпонентных металлических систем. Достаточно успешно разрабатываются полуэмпирические и теоретические уравнения изотерм поверхностного натяжения (ПН) [1–5] и методы расчета свойств поверхностного слоя (ПС) систем с неограниченным числом компонентов [6–8]. С каждым годом увеличивается объем экспериментальных данных по поверхностному натяжению и плотности многокомпонентных расплавов [9–14], которые могут служить основой для разработки новых более строгих теоретических моделей поверхностного слоя многокомпонентных расплавов. Повышенный интерес исследователей к изучению ПС многокомпонентных расплавов можно объяснить их широким применением в промышленности [15].

Однако, как показывает анализ литературных источников, из полученных экспериментальных данных по ПН и плотности тройных и четырехкомпонентных расплавов исследователями не в полной мере извлекается информация о термодинамических параметрах ПС исследуемых расплавов. Как правило, экспериментаторы ограничиваются апробацией полуэмпирических и теоретических уравнений изотерм ПН на полученных экспериментальных данных, а в некоторых работах проведены расчеты состава ПС изученных расплавов по уравнению Дж. Батлера [16].

Обзор литературных источников показывает, что подавляющее большинство экспериментально изученных многокомпонентных систем являются тройными. Поэтому вывод уравнений и разработка методики вычисления термодинамических параметров ПС тройных систем по концентрационной зависимости ПН представляет научный и практический интерес.

А.И. Русановым [17] получено фундаментальное уравнение, которое является аналогом уравнения Гиббса. Для бинарных систем из этого уравнения были получены выражения и разработан метод определения состава и минимально возможной толщины ПС по концентрационной зависимости ПН. Однако полученные уравнения содержат молярную поверхность, концентрационная зависимость которой неизвестна. Автором [17] был предложен приближенный метод определения этой зависимости по объемному эффекту смещения. Однако при этом сделано предположение о том, что зависимость молярных объемов от состава ПС такая же, как и в объемной фазе, что несколько снижает надежность получаемых результатов.

Более строгое выражение для зависимости молярной поверхности от состава бинарной системы получено авторами [18], которые для этих целей воспользовались известным выражением

Влияние темпа нарастания тепловой нагрузки на кривую кипения насыщенного азота*

А.А. Лаврухин¹, М.И. Делов¹, Д.М. Кузьменков¹, К.В. Куценко¹

¹ *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия*

Представлены результаты экспериментального исследования влияния темпа нарастания тепловой нагрузки на кривую кипения насыщенного азота. До граничного темпа нарастания нагрузки динамические кривые качественно совпадают с квазистационарными. При увеличении темпа нарастания перегрев закипания увеличивается, критический тепловой поток постоянен и соответствует первому критическому. Выше граничного темпа отсутствует стадия пузырькового кипения, критический тепловой поток падает до значения минимального нестационарного критического теплового потока.

Ключевые слова: *кривая кипения, нестационарный теплообмен, кризис кипения.*

Введение

Работа теплового энергетического оборудования при номинальных условиях эксплуатации обычно характеризуется постоянством условий теплоотдачи. В случае нарушения нормальных условий эксплуатации в таких устройствах возникают переходные и нестационарные режимы теплообмена, которые могут сопровождаться изменением теплового потока с теплоотдающей поверхности.

Как правило, при анализе таких процессов используется квазистационарное приближение, в рамках которого коэффициент теплоотдачи принимается равным стационарному значению при заданном тепловом потоке [1, 2]. Применение данного предположения нуждается в обосновании, так как динамическая кривая кипения, полученная при увеличении мощности тепловыделения, может существенно отличаться от квазистационарной кривой. Одна из первых работ, где авторы представили экспериментальное исследование зависимости коэффициента теплоотдачи от скорости изменения тепловой нагрузки, датируется 1968 г. [3]. В дальнейшем появились модели, описывающие поведение коэффициента теплоотдачи в нестационарных условиях. Большинство из них относится к режиму теплообмена в однофазной среде, подробный обзор таких моделей представлен в работе [4].

Переходные процессы могут также возникать при переходе от режима однофазной конвекции к пузырьковому кипению или в случае возникновения кризиса теплоотдачи. Такая смена режима теплоотвода всегда сопровождается существенным изменением коэффициента теплоотдачи.

Работ, посвященных гетерогенному возникновению зародышей пара на границе раздела жидкости и теплоотдающей поверхности, закипанию, достаточно много [5, 6], при этом большинство из них имеет эмпирический характер. Общим знаменателем в них является то, что центрами парообразования являются имеющиеся на твердой поверхности многочисленные углубления, поры, трещины и т.д. Наиболее вероятно генерация пара на тех впадинах, стенки которых плохо смачиваются жидкостью, так как гетерогенная нуклеация здесь значительно облегчена. Образование и рост паровых пузырей происходит в перегретом вблизи стенки слое жидкости, где температура резко изменяется по нормали к поверхности теплообмена и постоянно пульсирует. Поэтому непосредственное использование теоретических выражений невозможно, вводятся эмпирические коэффициенты, значения которых могут меняться более чем на порядок [7]. Введение нестационарной составляющей еще больше затрудняет описание процесса. На данный момент показано лишь то, что при повышении скорости увеличения плотности теплового потока перегрев закипания увеличивается по сравнению с квазистационарным значением, приближаясь к пределу, предельному перегреву гомогенного зародышеобразования.

Также можно отметить наличие большого количества исследований перехода от пузырькового режима кипения к пленочному, что объясняется нежелательностью такого процесса в устройствах, при охлаждении которых имеют место граничные условия второго рода. Рассмотрены как за-

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01009, <https://rscf.ru/project/22-29-01009/>.

Экспериментальное исследование теплофизических свойств растворов борной кислоты с учетом особенностей водно-химического режима ВВЭР

А.А. Лебезов¹, А.В. Морозов¹, А.Р. Сахипгареев¹, А.С. Шлепки¹

¹ АО «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского», г. Обнинск, Россия

Представлены результаты экспериментальных измерений теплофизических свойств водных растворов борной кислоты с фиксированной добавкой гидроксида калия. Описаны методики и установки для проведения экспериментальных исследований. Получены аппроксимирующие зависимости для определения плотности и кинематической вязкости водных растворов борной кислоты концентрацией 8 г/кг H₂O с гидроксидом калия.

Ключевые слова: теплофизические свойства, плотность, вязкость, борная кислота, водно-химический режим, ВВЭР.

Введение

Активное использование борной кислоты при эксплуатации атомных электрических станций с реакторами типа ВВЭР и PWR обусловлено тем, что входящий в ее состав изотоп Бор-10 обладает способностью поглощать нейтроны [1]. Борная кислота устойчива в радиационных полях, не разлагается при высоких температурах, не образует шлама и накипи, в присутствии щелочей является ингибитором коррозии. В связи с этим она применяется в системах борного регулирования, предназначенных для изменения реактивности в течение кампании реактора.

Однако применение борной кислоты вызывает в теплоносителе первого контура ряд сопутствующих явлений: повышение величины жесткости, изменение pH и возрастание концентрации примесей коррозионного происхождения при всех прочих постоянных условиях [2], поэтому необходима коррекция водного режима путем подщелачивания гидроокисью калия (отечественные реакторы), либо гидроокисью лития (на зарубежных реакторах PWR) [3].

На АЭС с ВВЭР и PWR для поддержания высокого качества водяного теплоносителя, повышения надежности и безопасности работы энергетического оборудования применяется комплекс эксплуатационных и конструкторских мероприятий, обеспечивающих оптимальные физико-химические характеристики теплоносителя и рабочего тела [3]. Данный комплекс назван водно-химическим режимом (ВХР).

Оптимальное ведение ВХР первого контура и функционирование средств его поддержания являются одним из условий минимизации накопления активированных продуктов коррозии, а также радиоактивных отходов и сброса этих отходов в окружающую среду.

Так, например, в первом контуре реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 на энергетических уровнях мощности применяется слабощелочной восстановительный аммиачно-калиевый водный режим с борной кислотой [3]. Диагностические показатели pH теплоносителя первого контура должны находиться в пределах от 5.8 до 10.3. На АЭС с ВВЭР-1200 при работе энергоблока на мощности принят слабощелочной восстановительный координированный водородно-калиевый ВХР с борной кислотой [4].

На зарубежных реакторах с водой под давлением для компенсации борной кислоты применяют гидроксид лития (LiOH). Водородный показатель pH, поддерживаемый в пределах от 6.9 до 7.4 при концентрациях H₃BO₃ – 1800–3000 мг/кг и LiOH – 2.2–3.5 мг/кг [5], необходим для контроля коррозии материалов первого контура, а также для уменьшения переноса продуктов коррозии. По мере уменьшения концентрации борной кислоты в течение кампании реактора концентрация гидроксида лития уменьшается до 0.6 мг/кг [5].

В работе [6] сообщается, что в теплоносителе первого контура реактора PWR концентрация борной кислоты по бору составляет 900–1800 мг/кг в начале кампании, а концентрация гидроксида лития – 2–5 мг/кг.

Помимо LiOH на некоторых зарубежных АЭС с PWR для регулирования pH при введении борной кислоты в теплоноситель первого контура применяются три щелочных реагента: гидроксид натрия (NaOH), фосфат натрия (Na₃PO₄*12H₂O) и тетраборат натрия (Na₂B₄O₇*10H₂O) [7].

Исследование нагрева вращающихся дисков и цилиндрических заготовок в электромагнитном поле магнитов и сверхпроводниковых индукторов

А.Р. Лепешкин^{1,2,3}, В.Е. Иванов³, Ч. Гуанхуа³

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

³Северо-Западный политехнический университет, г. Сиань, Китай

Проведены исследования процессов моделирования нагрева вращающихся дисков турбин, изделий и заготовок с использованием постоянных магнитов и сверхпроводниковых индукторов. Приведены результаты расчетных и экспериментальных исследований теплового состояния вращающихся дисков турбин в электромагнитном поле, созданном индукторами, модельного диска, вращающегося в магнитном поле, созданном сильными постоянными магнитами, на разгонном стенде и вращающейся алюминиевой цилиндрической заготовки в электромагнитном поле сверхпроводниковых индукторов.

Ключевые слова: моделирование, нагрев, диск, заготовка, электромагнитное поле, магнит, сверхпроводниковый индуктор, частота вращения.

Введение

Тепловые циклические испытания дисков и лопаток турбин газотурбинных установок (ГТУ) и газотурбинных двигателей (ГТД) и других деталей машин с воспроизведением эксплуатационных тепловых процессов и механического нагружения по разработанным методикам проводятся на разгонных и специализированных стендах с использованием индукционного нагрева. На данных стендах и установках осуществляются мероприятия по энергосбережению при испытаниях деталей турбин и машин [1–3].

Применяются различные методы нагрева: индукционный [1–4], аэродинамический, газодинамический, радиационный для реализации тепловых процессов в телах вращения для проведения разгонных и термоциклических испытаний дисков и изделий авиационных ГТД, турбин энергетических установок и других вращающихся деталей машин на разгонных и специализированных стендах и установках [1, 2]. Индукционный нагрев позволяет обеспечить высокие скорости нагрева и получить заданное неравномерное распределение температур по радиусу диска, соответствующего эксплуатационным условиям при испытаниях на разгонных стендах [1, 2]. Натурные эксперименты и разгонные испытания с индукционным нагревом вращающихся дисков на установках и стендах связаны с существенными материальными затратами. Кроме того, при использовании симметричных кольцевых индукторов, расположенных дискретно по радиусу вращающегося диска, возникают значительные локальные перепады температур до 40 °С и при вращении диска не возникает дополнительная тепловая энергия [1]. Для устранения указанных недостатков можно использовать и разработать энергосберегающие методы нагрева вращающихся дисков с использованием сильных постоянных магнитов [2] и сверхпроводящих индукторов [2]. При вращении диска в электромагнитном поле указанных устройств возникает тепловая энергия в нем за счет появления наводимых вихревых токов.

В последние годы появились работы по использованию постоянных магнитов в нагревательных устройствах [2, 5–9]. В патенте [2] представлен новый метод нагрева вращающихся дисков и изделий с применением постоянных магнитов, основанный на экспериментальных исследованиях. В [6–9] представлены результаты только расчетных исследований нагрева металлических заготовок в электромагнитном поле вращающихся постоянных магнитов на частотах 3000–3500 об/мин, что ограничивает температуры нагреваемых неподвижных заготовок.

В данной работе рассматриваются разные варианты нагреваемых вращающихся деталей: плоских дисков и цилиндрических заготовок, и разные способы создания электромагнитных полей. Также рассматриваются предлагаемые методы расчета нагрева указанных металлических деталей за счет вращения в электромагнитных полях, создаваемых разными способами. В первом случае проводятся исследования нагрева плоского диска, вращающегося в электромагнитном поле, созданном сильными постоянными магнитами. При этом ЭДС вихревых токов наводится при враще-

Гемодинамические аспекты проблемы увеличения срока службы сосудистых трансплантатов*

В.М. Молочников¹, А.Б. Мазо², Е.И. Калинин², Н.Д. Пашкова¹, И.В. Никифоров^{1,3}

¹ Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН», г. Казань, Россия

² Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

³ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия

Представлены результаты физического и численного моделирования пульсирующего течения крови области разветвления каналов, моделирующей дистальный анастомоз бедренной артерии. Соединение шунта и артерии-хозяина выполнено под углом 60°. Эксперименты и расчеты проводились при условии соблюдения подобия с течением крови в бедренной артерии по числу Рейнольдса, безразмерной частоте и относительной амплитуде пульсаций. Колебания расхода соответствовали закону его изменения за период сердечного цикла. Эксперимент включал визуализацию течения и измерение мгновенных векторных полей скорости потока с использованием техники SIV (Smoke Image Velocimetry). Расчеты проводились методом прямого численного моделирования (DNS). Соотношение расходов через ответвления основной артерии составляли: 80% – в антеградном и 20% – в ретроградном направлениях. Выявлено фазовое и пространственные положения областей отрыва потока, формируемых в подводящем канале и ответвлениях. Представлена эволюция профилей скорости потока и ее среднеквадратичных пульсаций по фазе колебаний расхода. Установлены фазы и области течения, в которых наблюдается существенный рост пульсаций скорости потока. Предложены физические механизмы, объясняющие этот рост. Обнаружено существование вторичных течений в сечениях подводящего канала и ответвлений. По данным DNS получены некоторые закономерности изменения продольной и окружной компонент вектора трения по окружной координате и фазе колебаний расхода.

Ключевые слова: дистальный анастомоз, бедренная артерия, эксперимент, прямое численное моделирование, пульсирующее течение, области отрыва потока, вторичные течения, турбулиизация потока, компоненты вектора поверхностного трения.

Введение

Сердечно-сосудистые заболевания являются основной причиной смертности во всем мире. Поэтому неслучайно, что исследования сердечно-сосудистой системы и последствий нарушения ее функционирования становятся одной из приоритетных научных проблем. Известно, что тромбоз или атеросклероз могут вызвать частичную или полную блокаду артерии. В случае серьезной закупорки проводят операцию шунтирования, обеспечивающую кровоток в обход пораженного участка артерии. В процессе операции один конец трансплантата (шунта) соединяется с артерией выше закупоренного участка (проксимальный анастомоз), а другой – ниже области закупорки (дистальный анастомоз). Однако эффективность шунтирования часто ограничивается гиперплазией интимы – разрастанием внутренней поверхности сосудов в анастомозе, что существенно уменьшает срок службы трансплантата и приводит к необходимости повторного оперативного вмешательства. Многочисленные исследования показали существенное влияние на эти процессы локальной гемодинамики в области соединения шунта с артерией-хозяином [1–5]. В частности, причиной гиперплазии интимы называют низкое напряжение сдвига на стенке сосуда [5–7], его значительные временные и пространственные градиенты [8].

Периферические артерии нижних конечностей являются типичным местом, подверженным атеросклерозу [9]. Соответственно, бедренно-подколенное шунтирование относится к наиболее распространенному виду сосудистой хирургии. Особенностью течения крови в бедренной артерии и ее подколенном участке является так называемый трехфазный закон изменения расхода за период сердечных сокращений, который включает участок антеградного пика, участок возвратного течения, а затем еще один антеградный пик меньшей интенсивности [10]. Первый антеградный пик имеет значительную амплитуду (до восьми средних значений расхода), а участок реверса расхода может достигать 30% периода сердечного цикла. Тем не менее режим течения крови в здоровой бедренной артерии даже при максимальном расходе остается, как правило, ламинарным. Однако

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 20-61-47068.

Сравнение эффективности микроканальных и микроструйных систем для охлаждения теплонапряженного оборудования*

А.С. Мордовской¹, А.С. Шамирзаев¹, В.В. Кузнецов¹

¹ *Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

Исследован теплообмен при микроканальном охлаждении (2 канала глубиной 300 мкм) и при микроструйном охлаждении с решеткой высокоплотной конфигурации (36 струй, диаметр струи 174 мкм) с использованием диэлектрического хладагента HFE-7100. Для обеих систем получены экспериментальные зависимости снятого теплового потока от перегрева стенки для разных массовых скоростей. Проведено сравнение коэффициента энергоэффективности для обеих систем при различных плотностях орошения, и установлены границы эффективной применимости микроструйного и микроканального охлаждения.

Ключевые слова: микроструи, микроканалы, теплообмен, коэффициент теплоотдачи, эффективность охлаждения, тепловые потоки, плотность орошения, кипение, конвекция, кризис кипения.

Введение

Актуальность проблемы охлаждения теплонапряженного оборудования обуславливается ростом эффективности устройств совместно с их миниатюризацией. В докладе IRDS за 2022 г. [1] приводится прогноз, согласно которому тепловыделение (TDP) высокопроизводительных процессоров возрастет на 35% к 2026 г. В этом же году компания TSMC планирует запустить производство процессоров с техпроцессом в 2 нм, но дальнейшее его уменьшение сталкивается с физическими ограничениями: диаметр одного атома кремния составляет 0.24 нм. Логичной видится тенденция (без отказа от кремниевой технологии) увеличения транзисторов путем создания объемной 3D-архитектуры чипа (3D chip stacking), развитие которой уже набирает обороты [2]. При таком подходе главной проблемой станет тепловыделение, которое будет растикратно толщине многослойного процессора.

Наиболее эффективными методами охлаждения теплонапряженных поверхностей являются микроканальное и микроструйное охлаждение. Преимущество микроканального метода в меньших перепадах давления, по сравнению с микроструями, и более легкой интеграции на компонентах микроэлектроники [3]. Так, в работе [4] на поверхности чипа выращена микроканальная структура, позволяющая охлаждать поверхность в однофазном режиме с высокой эффективностью. Существует большое количество работ, посвященных изучению тепло-массообмена в сборках микроканалов [3–8]. В то же время наличие высокой вариативности геометрии и возможности применения модификации поверхности теплообмена (оребрение, нанесение микроструктурированных покрытий и т.п.) делает задачу исследования теплообмена в таких системах до сих пор актуальной, особенно при использовании двухфазных потоков. Например, в работе [7] для прямоугольных каналов показана высокая эффективность теплообмена с увеличением соотношения сторон. С другой стороны, уменьшение высоты канала увеличивает не только число Нуссельта, но и перепад давления в канале, что важно учитывать для практического применения [8].

Преимущество микроструй заключается в возможности снятия гораздо больших тепловых потоков с единицы площади. Применение двухфазного режима охлаждения при кипении недогретого теплоносителя на поверхности позволяет снимать значительно большие тепловые потоки, используя скрытую теплоту парообразования теплоносителя, и интенсифицировать тем самым теплоотдачу, что показано в работе [9]. Использование высокоплотного массива микроструй приводит к более равномерному распределению коэффициента теплоотдачи поверхности теплообмена [10], в работе [11] показано, что однородность температуры поверхности увеличивалась по мере сокращения расстояния между струями. Следует отметить, что работы, использующие в экспериментах большое количество струй, ограничены по тепловым потокам, в то время как работы с доминирующим влиянием пузырькового кипения используют в эксперименте одиночные струи [12].

Использование двухфазных потоков в микросистемах сталкивается с проблемой инициации кризиса кипения, поэтому необходимы дополнительные меры для увеличения критического теп-

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №21-19-00626.

Исследование двухтемпературной модели теплообмена в плазме*

А.В. Пашин¹, Ю.А. Крюков¹, В.А. Кудинов¹

¹ Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

Применительно к нагреву плазмы переменным электрическим током выполнено детальное исследование двухтемпературной модели переноса тепла, включающей взаимосвязанные уравнения электронной и ионной теплопроводности. Анализ результатов численных исследований позволяет сделать вывод о том, что при прочих равных условиях основное влияние на температурное состояние плазмы оказывает коэффициент объемной теплоотдачи Bi . И, в частности, при малых его значениях наблюдается существенное различие в температурах электронов и тяжелых частиц. С увеличением интенсивности теплообмена Bi разность температур между электронами и тяжелыми частицами уменьшается, а также уменьшается и время выхода на стационарное состояние. Определено предельное значение критерия $Bi = 111$, при котором исчезают различия между температурными профилями электронов и тяжелых частиц, следовательно, найдена граница применимости двухтемпературной модели теплообмена в плазме.

Ключевые слова: теплообмен, плазма, двухтемпературная модель, электроны, ионы.

Введение

Применительно к исследованию быстропотекающих процессов теплообмена известно направление, основанное на использовании модели двухтемпературного нагрева металлов [1–8]. Эта модель основана на предположении, что электронный газ и кристаллическая решетка не находятся в тепловом равновесии и что время установления равновесия в каждой системе по отдельности значительно меньше времени его установления между электронами и решеткой. В этом случае в системе происходит неравновесный процесс, в котором рассматриваются две температуры – для электронов и решетки, имеющих конечную разность температур в каждой макроскопической точке системы.

Аналогичный подход применим для описания теплообмена в газоразрядной плазме. Известно, что в плазме наблюдаются большие разности температур между электронным газом и тяжелыми частицами (положительно заряженными ионами и нейтральными частицами) [7, 8]. Происхождение этой разности можно установить, если принять следующие допущения:

1) Время установления равновесия в электронном газе и в газе из тяжелых частиц значительно меньше времени установления равновесия между ними. В этом случае состояние плазмы в неустановившихся процессах может быть описано двумя температурами – для электронов и тяжелых частиц с конечной разностью температур в каждой макроскопической точке плазмы. Очевидно, что двухтемпературная модель теплообмена в плазме будет состоятельна лишь в случае, если рассматриваются такие процессы, для которых время наступления стационарного режима значительно превышает время установления равновесия в каждом из отдельных газов.

2) Считаем, что выравнивание температур в каждой макроскопической точке плазмы происходит путем теплопроводности, называемой, в отличие от известной теплопроводности, теплопроводностью в точке.

Исследованию температурных полей в плазме путем решения двухтемпературной краевой задачи посвящено несколько работ [9–12]. Известно, что коэффициент теплоотдачи между электронами и тяжелыми частицами является одним из важнейших параметров, существенно влияющих на процесс энергообмена. Поэтому в настоящей работе будет проведено исследование его влияния на температурное состояние электронов и тяжелых частиц плазмы.

* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSSE-2023-0003) в рамках государственного задания Самарского государственного технического университета.

Влияние проникновения жидкости в пористый нановолокнистый материал с варьлируемой смачиваемостью при соударении с ним капли с частицами микрогеля*

М.В. Пискунов¹, В.С. Фёдоров¹, А.Е. Ашихмин¹,
А.Е. Пискунова¹, Е.Ю. Мельник¹, Е.Н. Больбасов¹

¹ *Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

Проведено экспериментальное исследование влияния инерции и отличий между давлением смачивания и антисмачивания в рамках явления проникновения жидкости при падении капли водного раствора агара с частицами микрогеля на нановолокнистые покрытия с различной смачиваемостью (покрытие с полным впитыванием воды и гидрофобное покрытие) на гидродинамическое поведение капель в фазах растекания и стягивания. Разработана физическая модель течения жидкости под соударяющейся каплей вдоль и внутрь микро- и наноструктурных элементов нановолокнистых покрытий, учитывающая наравне с инерцией отличия между давлением смачивания и антисмачивания.

Ключевые слова: смачивание, проникновение жидкости, закрепление контактной линии, нановолокно, соударение типа «капля – стенка», тканевая инженерия, биопечать.

Введение

Явления проникновения и впитывания жидкости внутрь пористых и шероховатых покрытий и материалов [1, 2] во время растекания, стекания или релаксации капли жидкости [3] представляют серьезный вызов в исследованиях течения капельных жидкостей на межфазной границе ввиду разнообразно выраженного и пока еще мало изученного влияния со стороны характеристик поверхности соударения на микро- и наномасштабе. Речь идет о непродолжительной фазе контакта капли с материалом, заключенной между моментом ее контакта поверхности и началом капиллярного смачивания. Существующие аналитические выражения, полученные на основе эмпирических и полуэмпирических данных, как правило, помимо свойств жидкости и начальных параметров соударения, включают вклад контактного угла (равновесного или динамического) [4, 5]. Последний, стоит признать, мало пригоден для оценки влияния проникновения жидкости в структурированные или неструктурированные покрытия и материалы, выполненные механически [6], а также с использованием разнообразных химических веществ [7], включая нетканые волокнистые из (био)полимеров [2]. Так, стремление управлять осаждением капель в прикладных задачах привело к появлению ряда исследований, в которых рассматривается и учитывается проникновение жидкости в неоднородную структуру покрытия. В этих задачах динамика соударения капли жидкости с высоким поверхностным натяжением и низкой вязкостью исследуется при варьировании начальной скорости капли жидкости и геометрических параметров поверхностей, таких как среднее расстояние между выступами, их диаметр и высота [8].

Многие из процитированных исследований нацелены на развитие технологий водоотталкивающих (и не только воду; здесь речь идет не только про супергидрофобные поверхности, но и суперамфибобные) покрытий. В настоящем исследовании, как в работе Денга и др. [9], покрытие в рассматриваемом аспекте неоднородно как по глубине покрытия, так и в тангенциальном направлении в отношении поверхности соударения. Тогда явление проникновения и результат соударения капли с неоднородным покрытием должны зависеть от соотношения давления Бернулли и давления при проникновении жидкости в случае открепления контактной линии [9].

В исследовании будет рассматриваться влияние проникновения водного раствора агара в рамках капли с частицами микрогеля в нановолокнистые покрытия с различной смачиваемостью (от полного впитывания воды до статического контактного угла $\theta = 120^\circ$), подчеркивая значимость исследований этого явления не только с точки зрения функциональных отталкивающих жидкости покрытий, но и в отношении биоинженерных нановолокнистых скэффолдов в тканевой инженерии.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20109, <https://rscf.ru/project/22-29-20109/> и средств Администрации Томской области.

Стационарная газодинамика и теплообмен турбулентных потоков в подающих системах разных конфигураций с клапанным механизмом*

Л.В. Плотников¹, В.А. Шурупов¹, В.А. Следнев¹, Д.А. Давыдов¹, Д.Н. Красильников¹

¹ Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

Рассмотрено влияние конструкции криволинейного канала на газодинамику и теплоотдачу турбулентных потоков воздуха в подающей системе. Метод тепловой анемометрии применялся для получения местных и осредненных данных о скорости потока воздуха и коэффициенте теплоотдачи в трубопроводе. Установлено, что степень турбулентности потока воздуха в подающей системе изменяется в диапазоне $\pm 15\%$ при использовании криволинейных каналов с разными формами поперечного сечения. Выявлено, что имеет место интенсификация локального коэффициента теплоотдачи в подающей системе с профилированными каналами в диапазоне от 5 до 30% по сравнению с базовой конструкцией.

Ключевые слова: криволинейный канал, клапанный механизм, подающая система, турбулентный поток воздуха, интенсивность турбулентности, локальная теплоотдача.

Введение

Газодинамические (подающие) системы сложной конструкции применяются во многих технических устройствах: компрессоры, поршневые двигатели, турбины, сушильные аппараты, производственные печи и т.д. Эти системы обычно содержат большое количество различных конструктивных элементов: криволинейные каналы, препятствия (втулки, сужения), клапанный узел и др. Для повышения эффективности технических устройств необходимо совершенствование газодинамики и теплообмена в подающих системах [1, 2]. Поэтому получение экспериментальных данных о газодинамических и теплообменных характеристиках стационарных потоков в подающих системах сложной конфигурации является актуальной задачей в технических науках. Это позволит верифицировать математические модели, уточнить инженерные методы расчета и определить перспективные направления модернизации подобных газодинамических систем.

Ниже представлено краткое описание научных результатов других авторов по данной тематике. Например, существуют исследования по модернизации геометрии подающих систем в поршневых двигателях [3–5]. Так, Jiang F. et al. установили существенное влияние конструкции впускного трубопровода на мощность, расход топлива и КПД поршневого двигателя [3]. Jemni M.A. et al. показали, что доводка конфигурации подающей системы улучшает наполнение цилиндра вплоть до 40% на некоторых режимах работы двигателя. Подобные научно-технические исследования проводятся по отношению к подающим системам для силовых установок на базе газовых турбин [6–8]. В данном случае основная задача специалистов состоит в улучшении перемешивания топлива и воздуха, снижении гидравлического сопротивления, достижении устойчивой работы на всех режимах и т.д. При этом Radchenko A. et al. разработали оригинальную конструкцию системы газообмена на основе математического моделирования физических процессов с высокой точностью [8]. Также существуют работы по созданию математических моделей подающих систем для других видов тепловых двигателей: двигателей со свободно движущимися поршнями [9] и парогазового двигателя [10]. Подобные математические модели позволяют осуществлять отладку конструкции с минимальными материальными и временными затратами. Также известно, что начальные условия на впуске (температура, давление, влажность) оказывают существенное влияние на эксплуатационные показатели тепловых двигателей [11, 12]. Kaltakkıran G. et al. показали влияние низких температур на КПД поршневого двигателя [11]. В свою очередь, Wu H.-W. et al. определяли оптимальную температуру в подающей системе поршневого двигателя с целью снижения выбросов вредных веществ с отработавшими газами [12]. Конструкция подающей системы также оказывает заметное влияние на уровень шума тепловых двигателей [13, 14]. Уровень теплообмена в системах газообмена поршневых двигателей оказывает влияние на надежность, расходные характеристики, удельные показатели, а также на экологию [15].

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

Характеристики твердого остатка процесса газификации резинотехнических изделий*

К.Ю. Ушаков¹, В.З. Горина¹, А.Р. Богомолов¹

Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия

В интервале температур 940–980 °С исследованы твердые остатки углекислотной газификации резиновой крошки классом крупности 2–4 мм, полученной из отходов крупногабаритных шин грузового автотранспорта. Показано, что в исследуемом интервале температур углеродсодержащий остаток может быть использован в качестве сырья для производства углеродных сорбентов.

Ключевые слова: *резиновая крошка, газификация, твердый углеродсодержащий остаток, сорбент, текстурная характеристика.*

В России объем шин, которые ежегодно приходят в негодность, составляет более 800 000 т, при этом утилизируется лишь 25–28% [1]. Утилизация и переработка крупногабаритных шин в Кузбассе является одной из актуальных проблем, так как большинство угольных предприятий региона оснащено большегрузной техникой, в частности карьерными самосвалами, основными отходами которой являются отработанные шины.

К одним из наиболее известных способов переработки отходов резинотехнических изделий относится процесс пиролиза, в результате которого образуется пиролизный газ, жидкие продукты и твердый углеродсодержащий остаток. После пиролиза в [2] предложена стадия углекислотной газификации твердых отходов резинотехнических изделий. В работе [3] описан способ утилизации, включающий в себя последовательное проведение процессов пиролиза резины и активации углеродного остатка.

В работе [4] приведен анализ сорбционных свойств твердого остатка, полученного после пиролиза резинотехнических изделий при температуре 600 °С, результаты которого указывают на возможности его использования в качестве сорбента, но после проведения дополнительной активации.

Цель работы – исследование твердого остатка, полученного после пиролиза крупногабаритных шин и последующей его активации в углекислотной среде.

В качестве сырья для термообработки в работе использовалась измельченная фракция классом крупности 2–4 мм отходов крупногабаритных шин карьерных самосвалов, предоставленная компанией АО ХК «СДС-Уголь». Их основные характеристики приведены в табл. 1. Размер частиц резиновой крошки соответствует типичным размерам частиц некоторых производимых сорбентов в России и за рубежом, например, МАУ-ЗПТ (из каменных углей, размер частиц сорбента 1.2–3.5 мм), БАУ-А (1.0–3.6 мм), МИУ-С1 (2–5 мм).

После пиролиза при температуре 600 °С продолжительностью 70 мин проводился процесс углекислотной газификации при температурах 940, 960 и 980 °С на экспериментальной установке, схема и описание которой представлены в [2]. Выходы твердых остатков после пиролиза и углекислотной газификации при температурах 940, 960 и 980 °С составили 43.6, 34.4, 35.8 и 31.5% соответственно от общей исходной массы.

В табл. 1 приведены характеристики исходного сырья, твердых продуктов резиновой крошки после пиролиза и при различных температурах углекислотной газификации. Зольность резиновой крошки 5.8% позволяет ожидать получение сорбентов с невысокой зольностью.

После проведения пиролиза получен твердый остаток, характеристики которого значительно претерпели изменения по элементному составу в сравнении с исходным образцом. Содержание углерода снизилось на 45%, а содержание кислорода в твердом остатке многократно увеличилось. Это можно объяснить составом газообразных продуктов, в котором 95% представлено гомологи-

* Работа выполнена при финансовой поддержке в соответствии с дополнительным соглашением № 075-03-2021-138/3 о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на оказание государственных услуг (внутренний номер 075-ГЗ/Х4141/687/3).

Моделирование движения погруженной пластины в развитом свободно-конвективном слое*

С.А. Филимонов¹, А.А. Гаврилов¹, П.Г. Фрик², А.Н. Сухановский², А.Ю. Васильев²

¹ *Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

² *Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь, Россия*

Численно исследуется динамика пластины, погруженной в заполненную водой кювету. Нижняя стенка кюветы горячая, а верхняя холодная: в результате в объеме возникают конвективные течения, которые действуют на пластину, и она начинает двигаться. Моделирование движения пластины выполнено методом погруженных границ в 2D-постановке. Пластина совершает колебания от одной стенки к другой. С ростом числа Рэлея частота колебаний увеличивается, и они становятся более хаотичными, а термическое сопротивление, вызванное пластиной, снижается.

Ключевые слова: *естественная конвекция, моделирование подвижного тела, метод погруженных границ.*

Введение

Формирование течений, перенос тепла и примесей в различных геофизических системах в значительной степени обусловлены термогравитационной конвекцией [1]. В силу большого разнообразия конвективных течений, динамика и структура которых существенно зависят от многих факторов (интенсивности нагрева, свойств жидкости, геометрических параметров, граничных и начальных условий [2–4]), непрерывно появляются новые актуальные проблемы.

Одной из таких проблем является взаимодействие свободноплавающего, теплоизолирующего тела и конвективного течения. Первые исследования такого рода были мотивированы изучением механизмов смещения тектонических плит, которые моделировались при помощи пластин, плавающих на свободной поверхности слоя, нагреваемого снизу и охлаждаемого сверху [5–7]. Более общим случаем является система, состоящая из конвективного слоя и тела, плавающего в объеме жидкости. Первые исследования в такой постановке [8] показали, что структура конвективного течения и динамика плавающего диска существенно зависят от расстояния от свободноплавающего тела до изотермической границы и числа Рэлея. На карте режимов [8] показаны области параметров, в которых реализуются периодические движения тела, его нерегулярные осцилляции, и область, в которой тело остается неподвижным. Помимо изменения структуры течения, теплоизолирующее тело в объеме жидкости может существенно влиять на теплообмен. В [9] было проведено численное исследование влияния неподвижной теплоизолирующей пластины на структуру течений и теплообмен и показано, что интегральный тепловой поток практически не зависит от положения теплоизолирующей пластины, если высота расположения пластины значительно (в 10 и более раз) превышает толщину температурного пограничного слоя. На структуру течений и динамику тела существенное влияние оказывают три геометрических параметра, а именно: безразмерная высота, на которой плавает тело, отношение длины слоя к его высоте и отношение длины слоя к размеру тела. В работе [10] в постановке, максимально приближенной к [8], были проведены первые исследования влияния аспектного отношения (длины слоя к его высоте) на динамику движения свободноплавающего тела и структуру течений. Было показано, что периодические режимы возникают только в ограниченном диапазоне отношения размеров тела к размеру полости. При увеличении длины полости возникает хаотический режим движения с остановками диска, а при максимальной рассмотренной длине полости диск сносится в крайнее положение, выйти из которого не может. Лабораторные эксперименты позволяют выделить различные режимы движения диска, однако для понимания механизмов, которые определяют его движение, необходима детальная информация о структуре течения и распределении температуры. Эффективным инструментом для решения этой задачи является математическое моделирование, которое позволяет получить мгновенные значения скорости и температуры, рассчитать вязкие напряжения на поверхности тела и поток тепла. Трехмерное моделирование, несмотря на умеренные значения чи-

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-61-00098.

Моделирование детонационного горения двухтопливной газовой смеси углеводорода с водородом*

П.А. Фомин¹, А.В. Троцюк¹, И.В. Тетервова¹

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

Предложена обобщенная двухстадийная модель химической кинетики детонационного горения двухтопливной стехиометрической газовой смеси метан – водород – воздух. Она позволяет рассчитывать молярную массу и внутреннюю энергию смеси без расчета ее детального химического состава. Сделан двумерный численный расчет ячеистой многофронтной структуры детонационной волны в рассматриваемой смеси. Химические превращения описывались по предложенной модели. Рассчитанный размер детонационной ячейки, а также качественная структура детонации (нерегулярность ячеистой структуры, обусловленная формированием как основных, так и второстепенных поперечных волн, и неполное сгорание газа в детонационной волне) хорошо соответствуют эксперименту.

Ключевые слова: *двухтопливная смесь, метан, водород, модель кинетики, детонация, численный расчет, детонационная ячейка, многофронтная структура.*

Введение

Интерес к исследованию детонации двухтопливной газовой смеси метан – водород – воздух [1–8] связан, помимо чисто научного интереса, с перспективами ее технического использования, прежде всего, в двигателях на вращающейся детонации [9] и установках по детонационно-газовому нанесению порошковых покрытий [10].

Перспективы технического использования детонационного сгорания рассматриваемой смеси на основе метана обусловлены его дешевизной (метан – это природный газ!), возможностью избежать формирования экологически вредных продуктов детонации, относительной взрывобезопасностью при транспортировке и хранении, высокой теплотворной способностью. В то же время метан относится к числу труднодетонируемых газов, свидетельством чему является большой поперечный размер детонационной ячейки a_0 (порядка 34 см в стехиометрической метано-воздушной смеси) [11]. Это может приводить к существенному увеличению геометрических размеров детонационных двигателей [12] и проблемам инициирования детонационной волны (ДВ) [10]. Один из способов избежать подобных недостатков состоит в разбавлении метана легко детонируемым водородом. Размер детонационной ячейки в стехиометрической водородовоздушной смеси на порядок меньше, чем у метана [13], и, соответственно, увеличение концентрации водорода в метано-водородной смеси приводит к уменьшению a_0 [1–3, 7, 8]. Изменение соотношения между горючими в рассматриваемой смеси служит инструментом управления детонационными процессами и позволяет оптимизировать параметры соответствующих технических устройств.

Экспериментальные исследования многофронтной структуры самоподдерживающейся детонационной волны и измерение a_0 в смеси $\text{CH}_4\text{--H}_2\text{--воздух}$ выполнены в [1–8]. В основном рассматривалась стехиометрическая смесь вида

$$\alpha\text{H}_2 + (1 - \alpha)\text{CH}_4 + (2 - 1.5\alpha)(\text{O}_2 + 3.76\text{N}_2), \quad (1)$$

где α – относительная доля водорода в смеси метана с водородом. Варьировались начальные температуры, давления и соотношение между горючими. Отмечено, что нерегулярность структуры детонационной волны растет при увеличении относительной концентрации метана в смеси [1–3, 7]. Для нормальных начальных условий ячеистая структура при $0 < \alpha < 0.5$ экспериментально не исследована. В [3] предложена аналитическая зависимость размера ячейки от α , соответствующая имеющемуся эксперименту при $\alpha = 0$ и $0.5 \leq \alpha \leq 1$ и покрывающая весь диапазон $0 \leq \alpha \leq 1$.

Детонация двухтопливной смеси окиси углерода с водородом (синтез-газ) также перспективна с точки зрения технического использования, например, в ракетных двигателях [14] и установках по утилизации органических отходов ультра перегретым паром [15]. Экспериментальные исследования детонационных структур в синтез-газе при различном соотношении между горючими компонентами представлены в [16].

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01307, <http://rscf.ru/project/22-29-0137/>.

Экспериментальное исследование влияния наночастиц оксида кремния на режимы двухфазного течения в Y-образном микроканале*

А.А. Шебелева¹, А.В. Минаков^{1,2}, М.И. Пряжников¹, А.В. Шебелев^{1,2}, А.И. Пряжников¹

¹ Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

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

Проведено экспериментальное исследование влияния наночастиц оксида кремния на режимы двухфазного течения в прямом Y-образном микроканале. Были исследованы следующие жидкости: вода, нефть и суспензия на основе воды с массовой концентрацией оксида кремния 1%. Определены диапазоны существования снарядного, параллельного и капельного режимов течения. По результатам экспериментов построена карта режимов течения в зависимости от расходов жидкостей и капиллярного числа. Установлено, что при добавлении наночастиц оксида кремния с массовой концентрацией 1% существенно смещаются границы между режимами двухфазного течения в рассматриваемом микроканале.

Ключевые слова: режимы течения, карта режимов течений, двухфазные течения, микроканалы.

Введение

При разработке месторождений нефти и газа для увеличения нефтеотдачи используются методы, основанные на вытеснении жидкости. Несмотря на большое количество работ, изучающих поведение нефти в микропористых средах [1–3], систематических данных об имеющихся режимах течения в них все еще недостаточно. Это связано с влиянием достаточно большого количества параметров на течение, в том числе характерного размера пористой среды, физических свойств нефти и жидкости, которая ее вытесняет. Течения несмешивающихся жидкостей в микроканалах характеризуются различными режимами, такими как снарядный, скользяще-снарядный, капельный, параллельный, параллельный с деформированной границей, кольцевой, дисперсный [4–7], ривулетный и серпантинный [8]. Возникновение того или иного режима течения определяется балансом сил системы. Авторы работы [7] утверждают, что режим течения зависит от баланса сил инерции и поверхностного натяжения, выраженных числом Вебера. В других работах учитывается влияние вязкости жидкостей и используется комбинированный параметр из произведения чисел Вебера и Онезорге [8]. Кроме того, такие параметры, как приведенная скорость, число Рейнольдса [4], капиллярное число [9], а также комбинация чисел Рейнольдса и Вебера [10] были использованы для построения режимных карт с целью обобщения результатов и возможности предсказания области существования того или иного режима. Однако для практических приложений имеет значение не только сам режим, но и его гидродинамические характеристики. Для снарядного режима – это скорость, длина снарядов и циркуляция жидкости внутри них. Для длины снарядов была предложена полуэмпирическая формула [11], которая в дальнейшем была поставлена под сомнение в работе [8] для случая течений с контактной линией. Скорость снарядов линейно зависит от суммарной скорости фаз [8] с коэффициентом пропорциональности, зависящим от толщины пленки несущей жидкости, возникающей между снарядом и стенкой. Проведенный литературный обзор показал, что, несмотря на большое количество работ по двухфазным потокам жидкости [1–11], данная область является еще малоизученной, поэтому наша работа посвящена изучению влияния наночастиц оксида кремния на режимы двухфазного течения в прямом Y-образном микроканале.

Постановка экспериментов

Экспериментальное исследование проведено на чипе с Y-образным микроканалом, изготовленным из полимера (ПДМС) методами безмасковой литографии и анизотропного реактивно-ионного травления. Специальной обработки поверхности канала для придания поверхности гидрофильности или гидрофобности не производилось. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. Поперечные размеры входных каналов составляли 40×40 мкм, выходных

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

Ежемесячный научный журнал

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ФИЗИКА
IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

2023. Т. 66. № 11

Адрес редакции и издателя:
634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, д. 36,
Томский государственный университет,
редакция журнала «Известия вузов. Физика»

Старший редактор *Л.А. Пивоварова*
Выпускающий редактор *Л.В. Пермякова*
Редактор-переводчик *И.А. Бобровникова*
Оригинал-макет *Д.В. Фортеса*

Подписано к печати 22.11.2023. Выпуск в свет 24.11.2023. Заказ № 5677.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Печать цифровая.
Усл. п. л. 20.46. Уч.-изд. л. 22.92. Тираж 50 экз. Цена свободная.

Отпечатано на полиграфическом оборудовании
Издательства Томского государственного университета,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, тел. (3822) 531-528, 529-849.
<http://publish.tsu.ru>; e-mail: rio.tsu@mail.ru